

**Titre:** Évaluation de l'impact du vent et des manoeuvres hydrauliques sur le calcul des apports naturels par bilan hydrique pour un réservoir hydroélectrique  
**Title:**

**Auteur:** Mathieu Roy  
**Author:**

**Date:** 2014

**Type:** Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

**Référence:** Roy, M. (2014). Évaluation de l'impact du vent et des manoeuvres hydrauliques sur le calcul des apports naturels par bilan hydrique pour un réservoir hydroélectrique [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/1391/>  
**Citation:**

 **Document en libre accès dans PolyPublie**  
Open Access document in PolyPublie

**URL de PolyPublie:** <https://publications.polymtl.ca/1391/>  
**PolyPublie URL:**

**Directeurs de recherche:** Musandji Fuamba, & Leslie Dolcine  
**Advisors:**

**Programme:** Génie civil  
**Program:**

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉVALUATION DE L'IMPACT DU VENT ET DES MANŒUVRES  
HYDRAULIQUES SUR LE CALCUL DES APPORTS NATURELS PAR BILAN  
HYDRIQUE POUR UN RÉSERVOIR HYDROÉLECTRIQUE

MATHIEU ROY

DÉPARTEMENT DES GÉNIES CIVIL, GÉOLOGIQUE ET DES MINES

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION  
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES

(GÉNIE CIVIL)

AVRIL 2014

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé:

ÉVALUATION DE L'IMPACT DU VENT ET DES MANŒUVRES  
HYDRAULIQUES SUR LE CALCUL DES APPORTS NATURELS PAR BILAN  
HYDRIQUE POUR UN RÉSERVOIR HYDROÉLECTRIQUE

présenté par : ROY Mathieu

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. MAHDI Tew-Fik, Ph.D., président

M. FUAMBA Musandji, Ph.D., membre et directeur de recherche

M. DOLCINE Leslie, Ph.D., membre et codirecteur de recherche

Mme BOUCHER Marie-Amélie, Ph.D., membre

## DÉDICACE

*À tous ceux qui m'ont accordé leur confiance*

## REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je tiens à remercier mon encadreur Musandji Fuamba pour m'avoir donné l'opportunité d'effectuer la maîtrise à Polytechnique de Montréal. Je tiens également à le remercier pour son support ainsi que de m'avoir fourni toutes les ressources nécessaires pour l'accomplissement de ce travail.

Je tiens à remercier Leslie Dolcine pour m'avoir orienté dans ce projet, pour m'avoir encadré techniquement et pour tous les apprentissages que j'ai effectués par le biais de son support.

Je tiens à remercier Guillaume Lamothe pour son excellent travail concernant la préparation/calibration des modèles hydrodynamiques utilisés dans ce rapport.

Je tiens à remercier Nicolas Géhéniau pour son écoute active, son esprit critique et ses commentaires pertinents qui ont permis de bonifier ce travail.

Je tiens à remercier mes anciens collègues à Hydro-Québec Mathurin Daynou et Élane Robichaud pour les moments partagés et pour tous les apprentissages effectués au courant de mon séjour là-bas.

Je tiens à remercier mes collègues de bureau Essoyéké Batchabani, Fadoua Houssa et Ana Hosseinpour pour les moments partagés à Polytechnique.

Je tiens à remercier Jean-Philippe Ouellette pour avoir révisé une partie de ce rapport.

Je tiens à remercier Hydro-Québec pour m'avoir accordé un stage de longue durée ainsi que la permission d'utiliser leurs données hydrologiques et météorologiques.

Je tiens à remercier le CRSNG pour avoir financé ce projet de recherche

Finalement, j'aimerais remercier Marie-Ève Gagné et Robert Gagné pour leur support et leurs encouragements tout au long de cette épreuve.

## RÉSUMÉ

Le débit d'apport naturel qui alimente un réservoir hydroélectrique est une donnée très importante pour un gestionnaire de ressources hydriques. En effet, Hydro-Québec utilise les apports naturels historiques pour effectuer une prévision journalière de la quantité d'eau qui sera reçue à chacun des réservoirs de son parc hydroélectrique. Cette prévision permet d'établir des règles de gestion des centrales hydroélectriques dans le but d'optimiser la production sans toutefois compromettre la sécurité des ouvrages.

Afin d'obtenir une prévision d'apport naturel précise, les apports naturels des jours précédents doivent être précis. Cependant, il peut s'avérer très difficile de mesurer adéquatement ces apports naturels à cause des nombreux ruisseaux et rivières qui alimentent les réservoirs. Par conséquent, Hydro-Québec utilise une méthode indirecte pour le calculer. Cette méthode indirecte consiste à évaluer l'équation du bilan hydrique. Or, cette équation n'est pas à l'abri des erreurs et des incertitudes.

Un des intrants de cette équation est le niveau d'eau mesuré par un ou plusieurs limnimètres. Plusieurs sources d'erreurs, dont l'effet du vent et des manœuvres hydrauliques, peuvent affecter la lecture de ces instruments. Les fluctuations du niveau d'eau causées par ces effets se répercutent jusque dans l'équation de bilan hydrique faisant en sorte que le signal d'apport naturel devient bruité et entaché d'erreurs.

Le principal objectif de ce rapport consiste à évaluer l'incertitude causée par les effets du vent et des manœuvres hydrauliques sur l'équation de bilan hydrique. À cet effet, des modèles hydrodynamiques des réservoirs Outardes 4 et Gouin ont été préparés. Selon la revue de littérature, les effets du vent peuvent être étudiés soit en régime non permanent ou en supposant un état permanent.

Les simulations en état non permanent des effets du vent sur Outardes 4 et Gouin ont été effectuées par modélisation hydrodynamique. La considération d'un état non permanent implique que les conditions de vent varient au courant de la simulation. Cette caractéristique permet de prendre en compte la variation temporelle et la durée d'action du vent. De plus, cela permet de considérer des forces inertielles qui se traduisent par des seiches causées par des conditions de vent qui varient brusquement. Une fois les modèles calibrés, des simulations hydrodynamiques

en non permanent ont été effectuées en système fermé où la seule force agissante dans le modèle est le vent. À partir des niveaux simulés obtenus, l'équation de bilan hydrique a été calculée pour déterminer l'incertitude journalière des apports naturels en considérant un état non permanent. D'une part, au réservoir Outardes 4, une incertitude maximale de 20 m<sup>3</sup>/s a été estimée durant le mois d'octobre 2010. D'une autre part, au réservoir Gouin, une incertitude maximale de 340 m<sup>3</sup>/s a été estimée durant le mois de juillet 2012.

La modélisation en état permanent de l'effet du vent est une autre méthode pour étudier cette incertitude dans l'équation du bilan hydrique. Cette hypothèse consiste à supposer que le plan d'eau est instantanément débalancé sous l'influence du vent. Il n'y a pas d'effet temporel de la durée du vent et les forces inertielles du plan d'eau sont négligées selon cette méthode. Toutefois, ce type de modélisation se prête mieux à l'évaluation de l'incertitude du vent en temps réel. Deux approches en supposant un état permanent ont été expérimentées pour modéliser la différence des niveaux entre les limnimètres en fonction des caractéristiques du vent : la modélisation hydrodynamique et la régression non paramétrique. Il a été déterminé que les méthodes de régression sont plus performantes pour modéliser les différences de niveaux. Toutefois, l'utilisation de la modélisation hydrodynamique a permis de démontrer que pour étudier l'incertitude du vent sur l'équation du bilan hydrique, il est préférable d'étudier les réponses du vent individuellement à chaque instrument au lieu d'étudier les différences de niveaux entre les limnimètres. La modélisation hydrodynamique a également permis de déterminer un emplacement optimal pour un nouveau limnimètre au réservoir Gouin pour lequel le réseau de jauges limnimétriques serait le moins influencé par le débalancement du plan d'eau généré par le vent. Ensuite, l'incertitude de l'apport naturel journalier causée par l'effet d'un vent moyen journalier maximal observé durant le mois de juillet 2012 à Gouin a été évaluée à 134 m<sup>3</sup>/s. Soit près de trois fois moins de ce qui a été estimé en écoulement non permanent pour le même mois au même réservoir. Par conséquent, si l'hypothèse d'état permanent est admise dans le but d'évaluer l'incertitude du vent dans le calcul d'apport, il est recommandé de l'évaluer en considérant le vent maximal instantané observé durant la journée pour laquelle le bilan hydrique est effectué.

Par ailleurs, les manœuvres hydrauliques ont été modélisées par des régressions paramétriques et non paramétriques. Il a été déterminé que l'impact d'une ouverture/fermeture des vannes et d'un arrêt/démarrage de groupes turbine/alternateur aux réservoirs Gouin et

Outardes 4 est très faible sur leurs limnimètres amont respectifs. Toutefois, cet impact peut devenir significatif lorsqu'une manœuvre hydraulique survient simultanément avec un épisode de vent.

Finalement, une méthode de combinaison des variations des niveaux d'eau enregistrées aux limnimètres permettant de réduire les impacts du vent/manœuvres dans l'équation de bilan hydrique a été développée. Cette méthode, applicable en temps réel, consiste à attribuer une pondération variable aux limnimètres d'un réservoir. Les pondérations s'ajustent avec pour objectif de minimiser les réponses du vent qui ont été modélisées en considérant un état permanent. L'effet des manœuvres hydrauliques est également pris en compte dans l'attribution de la pondération du limnimètre amont. Il a été déterminé que cette méthode permet de corriger plusieurs fluctuations dans le signal d'apports naturels. Toutefois, certaines fluctuations présumées erronées persistent; ce qui témoigne de la complexité de corriger en temps réel l'effet du vent et des manœuvres dans l'équation du bilan hydrique.

## ABSTRACT

Natural inflow is an important data for a water resource manager. In fact, Hydro-Québec uses historical natural inflow data to perform a daily prediction of the amount of water that will be received in each of its hydroelectric reservoirs. This prediction allows the establishment of reservoir operating rules in order to optimize hydropower without compromising the safety of hydraulic structures.

To obtain an accurate prediction, it follows that the system's input needs to be very well known. However, it can be very difficult to accurately measure the natural supply of a set of regulated reservoirs. Therefore, Hydro-Québec uses an indirect method of calculation. This method consists of evaluating the reservoir's inflow using the water balance equation. Yet, this equation is not immune to errors and uncertainties.

Water level measurement is an important input in order to compute the water balance equation. However, several sources of uncertainty including the effect of wind and hydraulic maneuvers can affect the readings of limnimetric gages. Fluctuations in water level caused by these effects carry over in the water balance equation. Consequently, natural inflow's signal may become noisy and affected by external errors.

The main objective of this report is to evaluate the uncertainty caused by the effects of wind and hydraulic maneuvers on water balance equation. To this end, hydrodynamic models of reservoirs Outardes 4 and Gouin were prepared. According to the literature review, wind effects can be studied either by an unsteady state approach or by assuming steady state approach.

Unsteady state simulation of wind effects on reservoir Gouin and Outardes 4 were performed by hydrodynamic modelling. Consideration of an unsteady state implies that the wind conditions vary throughout the simulation. This feature allows taking into account temporal effect of wind duration. In addition, it also allows the consideration of inertial forces such as seiches which are caused by wind conditions that can vary abruptly. Once the models were calibrated, unsteady state simulations were conducted in closed system where unsteady observed winds were the only forces included. From the simulated water levels obtained at each gage, water balance equation was calculated to determine the daily uncertainty of natural inflow in unsteady conditions. At Outardes 4, a maximum uncertainty of 20 m<sup>3</sup>/s was estimated during the

month of October 2010. On the other hand, at the Gouin reservoir, a maximum uncertainty of 340 m<sup>3</sup>/s was estimated during the month of July 2012.

Steady state modelling is another approach to evaluate wind effect uncertainty in the water balance equation. This type of approach consists of assuming that the water level is instantly tilted under the influence of wind. Hence, temporal effect of wind duration and seiches cannot be taken into account. However, the advantage of steady state modelling is that it's better suited than unsteady state modelling to evaluate wind uncertainty in real time. Two steady state modelling methods were experimented to estimate water level difference between gages in function of wind characteristics: hydrodynamic modelling and non-parametric regression. It has been found that non-parametric models are more efficient when it comes to estimate water level differences between gages. However, the use of hydrodynamic model demonstrated that to study wind uncertainty in the water balance equation, it is preferable to assess wind responses individually at each gage instead of using water level differences. Furthermore, the hydrodynamic model of Gouin reservoir has allowed finding optimal location for a new limnimetric gage in order to minimize wind effect on the gage network. Afterwards, natural inflow uncertainty caused by a daily maximal wind observed during the month of July 2012 at Gouin was estimated at 134 m<sup>3</sup>/s, which is nearly three times less than what has been found with unsteady state modelling for the same time period and reservoir. Consequently, if a steady state approach is preferred to evaluate wind uncertainty of natural inflow, it is recommended to evaluate it by considering instantaneous maximal wind that was observed during the day for which the water balance equation is applied.

From another line of thought, hydraulic maneuvers were modeled with parametric and non-parametric regression. It has been found that gate openings/closings and stop/startup of turbine-generator at reservoirs Gouin and Outardes 4 have a very low impact on their upstream water level gage. However, this impact may become significant if a hydraulic maneuver is executed at the same time of a strong wind episode.

Finally, a combination method of water level gages observations has been developed. It allows reducing wind/hydraulic maneuvers impacts on the water balance equation. This method, which is applicable in real time, consists of assigning a variable weight at each limnimetric gages. In other words, the weights automatically adjust in order to minimize steady state modeled wind

responses. The estimation of hydraulic maneuvers has also been included in the gage weight adjustment. It has been found that this new combination method allows the correction of noisy natural inflow signal under wind and hydraulic maneuvers effects. However, some fluctuations persist which reflects the complexity of correcting these effects on a real time based daily water balance equation.

## TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE.....	III
REMERCIEMENTS .....	IV
RÉSUMÉ.....	V
ABSTRACT .....	VIII
TABLE DES MATIÈRES .....	XI
LISTE DES TABLEAUX.....	XVI
LISTE DES FIGURES .....	XIX
LISTE DES SYMBOLES .....	XXVII
LISTE DES ANNEXES .....	XXXII
CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	1
1.1 Mise en contexte et problématique.....	1
1.2 Objectifs .....	4
1.3 Organisation du rapport.....	6
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE .....	8
2.1 Introduction .....	8
2.2 Calcul des apports naturels par bilan hydrique à Hydro-Québec .....	8
2.3 Modélisation de l'effet du vent sur les lacs .....	15
2.3.1 Effet du vent sur les plans d'eau .....	15
2.3.2 Paramètres de modélisation du vent.....	17
2.3.3 Modélisation hydraulique 1D de l'effet du vent sur les plans d'eau.....	21
2.3.4 Modélisation hydrodynamique 2D de l'effet du vent sur les plans d'eau.....	24
2.3.5 Modélisation hydrodynamique 3D de l'effet du vent sur les plans d'eau.....	26
2.3.6 Formules empiriques .....	27

2.3.7	Régression non paramétrique .....	30
2.4	Modélisation de l'effet des manœuvres hydrauliques.....	34
2.5	Correction de l'effet de vent sur les niveaux.....	36
2.5.1	Choix du pas de temps de l'équation de bilan hydrique .....	37
2.5.2	Les méthodes de combinaisons .....	37
2.5.3	La technique de Manitoba Hydro.....	40
2.5.4	Les estimateurs spatiaux et optimaux de Croley .....	41
2.6	Conclusions et recommandations.....	42
CHAPITRE 3	MÉTHODOLOGIE .....	45
3.1	Caractérisation de l'effet du vent et des manœuvres hydrauliques sur l'équation du bilan hydrique.....	45
3.1.1	Modélisation de l'effet du vent en écoulement non permanent .....	47
3.1.2	Modélisation de l'effet du vent en supposant un écoulement permanent .....	47
3.1.3	Modélisation des manœuvres hydrauliques .....	48
3.2	Correction de l'équation du bilan hydrique.....	48
3.2.1	Évaluation du pas de temps optimal pour le calcul du bilan hydrique.....	49
3.2.2	Méthodes de combinaison par pondération des limnimètres .....	50
CHAPITRE 4	DESCRIPTION DES ÉTUDES DE CAS .....	51
4.1	Introduction .....	51
4.2	Description de TELEMAC-2D .....	51
4.3	Description des réservoirs à l'étude .....	56
4.3.1	Outardes 4 .....	57
4.3.2	Gouin.....	59
4.4	Données disponibles.....	60
4.4.1	Données hydrométriques.....	60

4.4.2	Données météorologiques .....	64
4.4.3	Données bathymétriques .....	67
4.5	Préparation des données bathymétriques .....	70
4.6	Génération des maillages .....	74
4.6.1	Considérations générales .....	74
4.6.2	Génération des maillages avec BlueKenue .....	74
4.7	Conclusions et recommandations .....	78
CHAPITRE 5 MODÉLISATION HYDRODYNAMIQUE DE L'EFFET DU VENT EN ÉCOULEMENT NON PERMANENT .....		79
5.1	Introduction .....	79
5.2	Préparation du modèle d'Outardes 4 .....	79
5.2.1	Analyse de sensibilité du maillage .....	80
5.2.2	Analyse de sensibilité du coefficient de rugosité de Manning .....	81
5.2.3	Analyse de sensibilité de la diffusion de la turbulence .....	82
5.2.4	Choix du pas de temps .....	83
5.2.5	Vérification des courants causés par un vent constant .....	85
5.2.6	Calibration du modèle .....	89
5.3	Simulation en système fermé d'Outardes 4 .....	96
5.4	Préparation du modèle de Gouin .....	98
5.4.1	Analyse de sensibilité du maillage .....	98
5.4.2	Analyse de sensibilité du coefficient de rugosité .....	100
5.4.3	Analyse de sensibilité de la diffusion de turbulence .....	101
5.4.4	Choix du pas de temps .....	102
5.4.5	Vérification des courants à l'état permanent causés par un vent constant .....	104
5.4.6	Calibration du modèle .....	107

5.5	Simulation en système fermé de Gouin.....	112
5.6	Conclusions et recommandations.....	114
CHAPITRE 6 MODÉLISATION DE L'EFFET DU VENT EN ÉCOULEMENT PERMANENT.....		116
6.1	Introduction .....	116
6.2	Modélisation hydrodynamique en écoulement permanent.....	116
6.2.1	Hypothèses de modélisation.....	117
6.2.2	Calibration du modèle de Gouin en écoulement permanent .....	119
6.3	Modélisation des différences de niveaux par régression non paramétrique.....	136
6.3.1	Régression non paramétrique à une variable explicative .....	136
6.3.2	Régression non paramétrique à deux variables explicatives .....	140
6.4	Comparaison des méthodes de modélisation en écoulement permanent .....	145
6.5	Modélisation des réponses par régression non paramétrique.....	148
6.6	Conclusions et recommandations.....	156
CHAPITRE 7 MODÉLISATION DES MANŒUVRES HYDRAULIQUES.....		160
7.1	Introduction .....	160
7.2	Méthodologie .....	160
7.3	Résultats .....	162
CHAPITRE 8 CORRECTION DE L'EFFET DE VENT ET DES MANŒUVRES HYDRAULIQUES SUR L'ÉQUATION DU BILAN HYDRIQUE .....		165
8.1	Introduction .....	165
8.2	Pas de temps du bilan hydrique.....	165
8.3	Méthodes de combinaison.....	169
8.4	Élaboration d'une nouvelle méthode de combinaison .....	172
8.5	Conclusions et recommandations.....	188

CHAPITRE 9	CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS .....	190
9.1	Contributions .....	193
9.2	Recommandations .....	194
RÉFÉRENCES .....		197
ANNEXES .....		201

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2-1 Différents indicateurs de performance permettant de juger de la qualité du signal d'apport naturel .....	12
Tableau 2-2 Les relations linéaires les plus usuelles de $CD$ en fonction de $U_{10}$ - Adapté de (Letchford & Zachry, 2009) .....	19
Tableau 2-3 Modèles simples à l'état permanent pour simuler l'effet du vent sur les plans d'eau .....	28
Tableau 4-1 Localisation des limnimètres et de la station de mesure de vent (anémomètre et girouette) - Adapté de Haché et al. (2003) .....	58
Tableau 4-2 Caractéristiques générales du réservoir Outardes 4 – Adapté de Haché et al. (2003) .....	58
Tableau 4-3 Localisation des limnimètres et de la station de mesure de vent (anémomètre et girouette) - Adapté de Haché et al. (2003) .....	59
Tableau 4-4 Caractéristiques du réservoir Gouin – Adapté de Haché et al. (2003) .....	60
Tableau 4-5 Disponibilité des données hydrométriques pour les réservoirs Outardes 4 et Gouin .....	62
Tableau 4-6 Axe reliant deux jauges limnimétriques $\theta AB$ et directions théoriques du vent pour lesquelles les différences de niveaux sont maximales et minimales – Tiré de Haché et al. (2003) .....	64
Tableau 4-7 Disponibilité des données météorologiques pour les réservoirs Outardes 4 et Gouin .....	65
Tableau 4-8 Caractéristiques des maillages pour Outardes 4 et Gouin .....	75
Tableau 5-1 Résultats des simulations de calibration d'Outardes 4 en fonction des indicateurs de performance décrits à la section 5.2.6.1 .....	95
Tableau 5-2 Résultats des simulations de calibration phase 1 du réservoir Gouin en fonction des indicateurs de performance décrits à la section 5.2.6.1 .....	110
Tableau 5-3 Résultats des simulations de calibration phase 2 du réservoir Gouin en fonction des indicateurs de performance décrits à la section 5.2.6.1 .....	111

Tableau 6-1 Extrait des résultats des simulations de calibration en écoulement permanent du réservoir Gouin – RMSE entre les différences de niveaux simulés et observés en fonction de la direction et de la vitesse du vent pour un coefficient de traînée égal à $1.0 \cdot 10^{-3}$ selon une élévation d'eau initiale de 403.63 m (moyenne de l'historique).....	122
Tableau 6-2 Comparaison du RMSE d'une modélisation à niveau d'exploitation fixe par rapport à une modélisation à niveau d'exploitation variable .....	123
Tableau 6-3 Calcul de l'incertitude d'apport naturel journalier causée par l'effet du vent en considérant un écoulement permanent .....	124
Tableau 6-4 Meilleur coefficient de traînée en fonction de la vitesse et la direction du vent.....	135
Tableau 6-5 Comparaison du RMSE des méthodes de modélisation en condition d'écoulement permanent pour le réservoir Gouin.....	146
Tableau 6-6 Avantages et désavantages des différentes approches de modélisation par TELEMAC 2D .....	157
Tableau 8-1 Facteur de pondération des limnimètres pour différentes méthode de combinaison pour les réservoirs Outardes 4 et Gouin .....	169
Tableau 8-2 Comparaison de la performance de différentes méthodes de combinaison pour le réservoir Outardes 4 .....	171
Tableau 8-3 Comparaison de la performance de différentes méthodes de combinaison pour le réservoir Gouin.....	171
Tableau 8-4 Comparaison d'indicateurs de performance pour la qualité du signal d'apport obtenu – Meilleure pondération fixe VS pondération variable par réponse combinée minimisée – Réservoir Outardes 4 .....	186
Tableau 8-5 Comparaison d'indicateurs de performance pour la qualité du signal d'apport obtenu – Meilleure pondération fixe VS pondération variable par réponse combinée minimisée – Réservoir Gouin .....	187

Tableau A1-1 Les 168 simulations de calibration de TELEMAC 2D pour un $CD = 0.5 * 10^{-3}$	201
Tableau A1-2 Les 168 simulations de calibration de TELEMAC 2D pour un $CD = 0.7 * 10^{-3}$	202
Tableau A1-3 Les 168 simulations de calibration de TELEMAC 2D pour un $CD = 1.0 * 10^{-3}$	202
Tableau A1-4 Les 168 simulations de calibration de TELEMAC 2D pour un $CD = 1.2 * 10^{-3}$	203
Tableau A1-5 Les 168 simulations de calibration de TELEMAC 2D pour un $CD = 1.4 * 10^{-3}$	203
Tableau A1-6 Les 168 simulations de calibration de TELEMAC 2D pour un $CD = 1.8 * 10^{-3}$	204
Tableau A1-7 Les 168 simulations de calibration de TELEMAC 2D pour un $CD = 2.8 * 10^{-3}$	204
Tableau A1-8 Les 168 simulations de calibration de TELEMAC 2D pour un $CD = 3.7 * 10^{-3}$	205
Tableau A1-9 Les 168 simulations de calibration de TELEMAC 2D pour un $CD = 4.7 * 10^{-3}$	205
Tableau A1-10 Les 56 simulations de calibration de TELEMAC 2D pour un $CD = 5.7 * 10^{-3}$	206
Tableau A1-11 Les 56 simulations de calibration de TELEMAC 2D pour un $CD = 6.7 * 10^{-3}$	206

## LISTE DES FIGURES

Figure 1-1 Représentation de différentes fluctuations improbables qui affectent le calcul d'apport naturel journalier par bilan hydrique pour le réservoir Baskatong en 1980 - Tiré de (Haché et al. 1996).....	2
Figure 1-2 Schématisation de l'effet du vent sur l'erreur de volume induite dans le calcul d'apport naturel par bilan hydrique – Adapté d'Alarie (2009).....	3
Figure 2-1 Schéma des différents paramètres de l'équation (2.1) – Tiré de Haché et al. (1996) ....	9
Figure 2-2 Schématisation des intrants pour estimer les trois termes de l'équation de bilan hydrique – Adapté de Haché et al. (1996).....	14
Figure 2-3 Schématisation du phénomène de seiche provoqué lorsqu'une force externe (vent) cesse d'agir sur le plan d'eau – Adapté de (Olsen, 2007) .....	16
Figure 2-4 Schématisation de l'angle entre la direction du vent et la direction locale du tronçon de rivière $\phi_{vent}$ , adapté de (Deltares, 2013) .....	22
Figure 2-5 Modélisation hydraulique 1D de l'effet du vent sur le lac Long Lake en Nouvelle-Écosse – a : Simulation du niveau d'eau pour des vents constants et uniformes de 15 m/s – b : Simulation du niveau d'eau pendant une seiche causée par l'arrêt d'un vent constant et uniforme de 15 m/s – Adapté de John et al. (1995) .....	23
Figure 2-6 Schématisation de la longueur de l'axe du lac sous le vent $FAB$ sur laquelle le vent exerce son influence entre les instruments A et B – Tiré de Haché et al. (2003) .....	30
Figure 2-7 Exemple d'application de la régression non paramétrique pour modéliser la différence de niveaux en fonction de la direction pour des vents de 15 km/h au réservoir Gouin – Tiré de (Haché et al., 2003) .....	33
Figure 2-8 Estimation de la différence de niveaux par régression non paramétrique entre les limnimètres des réservoirs Outardes 4 et Gouin pour différentes vitesses et direction de vent : (a) Outardes 4 Nord – Centrale Outardes 4, (b) Outardes 4 Sud – Outardes 4 Nord, (c) Outardes 4 Sud –Centrale Outardes 4 et (d) Gouin Sud-Ouest – Baie de Kikendatch .....	34

Figure 2-9 Exemple d'onde de translation amont et aval (manœuvre d'une vanne dans un canal) – Tiré de (Graf & Altinakar, 2000) .....	35
Figure 2-10 Équations descriptives des intumescences dues à une variation brusque de débit – Tiré de (Graf & Altinakar, 2000) .....	36
Figure 2-11 Exemple d'application de la méthode de Manitoba Hydro avec les observations du lac Winnipeg – Tiré de (Baird & Associates, 2000) .....	41
Figure 3-1 Diagramme de procédés de la méthodologie pour les objectifs 2,3 et 4 .....	46
Figure 3-2 Diagramme de procédés de la méthodologie pour les objectifs 5 et 6 .....	49
Figure 4-1 Intrants et étapes intermédiaires nécessaires pour simuler avec TELEMAC.....	54
Figure 4-2 Localisation générale des réservoirs Outardes 4 et Gouin .....	56
Figure 4-3 Localisation du réservoir Outardes 4 – Adapté de Haché et al. (2003).....	58
Figure 4-4 Localisation du réservoir Gouin – Adapté de Haché et al. (2003) .....	59
Figure 4-5 Apport naturel calculé par bilan hydrique (équation 2.3) pour le réservoir Outardes 4 en 2011 .....	63
Figure 4-6 Apport naturel calculé par bilan hydrique (équation 2.3) pour le réservoir Gouin en 2011 .....	63
Figure 4-7 Rose des vents et fréquences relatives des vitesses et direction pour le réservoir Outardes 4, zone effet max = 151° à 181° et zone effet min : 61° à 91° selon les différences de niveaux entre les trois limnimètres.....	66
Figure 4-8 Rose des vents et fréquences relatives des vitesses et direction pour le réservoir Gouin, zone effet max = 86° à 106° et zone effet min : 356° à 16° selon les différences de niveaux entre les deux limnimètres.....	66
Figure 4-9 Les 5 cartes topographiques avant remplissage du réservoir Outardes 4.....	68
Figure 4-10 Relevé bathymétrique près de la zone du canal d'aménagé à Outardes 4.....	68
Figure 4-11 Exemple d'une des cartes topographiques avant remplissage juxtaposée avec la topographie actuelle du site du réservoir Outardes 4 .....	69

Figure 4-12 Cartes bathymétriques du réservoir Gouin publiées par la compagnie « TRAK » ....	70
Figure 4-13 Préparation des données bathymétriques d'Outardes 4 – (a) Vectorisation, (b) Interpolation de la bathymétrie, (c) Courbe d'emmagasinement vectorisée VS officielle ....	72
Figure 4-14 Préparation des données bathymétriques de Gouin – (a) Vectorisation, (b) Interpolation de la bathymétrie, (c) Courbe d'emmagasinement vectorisée VS officielle ....	73
Figure 4-15 Maillage de Gouin à 223000 nœuds - Système de coordonnées UTM zone 18 avec un datum NAD83 .....	76
Figure 4-16 Maillage d'Outardes 4 à 142000 nœuds – Système de coordonnées UTM zone 19 avec un datum NAD83 .....	77
Figure 5-1 Analyse de sensibilité du maillage pour le réservoir Outardes 4 à un pas de temps d'une seconde.....	80
Figure 5-2 Analyse de sensibilité du coefficient de Manning pour le réservoir Outardes 4 à un pas de temps d'une seconde.....	81
Figure 5-3 Analyse de sensibilité du coefficient de diffusion des vitesses pour le réservoir Outardes 4 à un pas de temps d'une seconde.....	82
Figure 5-4 Choix du pas temps en fonction du temps de calcul réel et du nombre d'itérations maximales requises par le solveur numérique pour atteindre la convergence – Modèle d'Outardes 4 à 142 000 nœuds.....	84
Figure 5-5 Courants en état permanent dans le réservoir Outardes 4 près du limnimètre Nord pour un vent constant de 20 km/h provenant du Nord - Système de coordonnées UTM zone 19 avec un datum NAD83 .....	85
Figure 5-6 Courants en état permanent dans le réservoir Outardes 4 près du limnimètre Sud pour un vent constant de 20 km/h provenant du Nord - Système de coordonnées UTM zone 19 avec un datum NAD83 .....	86
Figure 5-7 Courants en état permanent dans le réservoir Outardes 4 près du limnimètre amont pour un vent constant de 20 km/h provenant du Nord - Système de coordonnées UTM zone 19 avec un datum NAD83 .....	86

Figure 5-8 Vitesses maximales atteintes par les courants durant la phase transitoire de la simulation pour le réservoir Outardes 4 .....	88
Figure 5-9 Données de forçage du modèle d'Outardes 4 pour le mois d'octobre 2010 pour les simulations de calibration.....	91
Figure 5-10 Conditions frontières d'Outardes 4 pour générer la condition initiale (a) et pour effectuer les simulations de calibration (b) .....	91
Figure 5-11 Courant de la condition initiale d'Outardes 4 près du limnimètre Nord– Système de coordonnées UTM zone 19 avec un datum NAD83 .....	92
Figure 5-12 Courant de la condition initiale d'Outardes 4 près du limnimètre Sud– Système de coordonnées UTM zone 19 avec un datum NAD83 .....	93
Figure 5-13 Courant de la condition initiale d'Outardes 4 près du limnimètre amont– Système de coordonnées UTM zone 19 avec un datum NAD83 .....	93
Figure 5-14 Simulation de calibration d'Outardes 4 pour la période de 2010/10/01 à 2010/10/31 .....	95
Figure 5-15 Estimation par simulation en système fermé de l'incertitude de l'apport naturel due à l'effet du vent pour le mois d'octobre 2010 à Outardes 4.....	97
Figure 5-16 Analyse de sensibilité du maillage pour le réservoir Gouin au niveau initial de .....	99
Figure 5-17 Analyse de sensibilité du maillage pour le réservoir Gouin au niveau initial de 400 m à un pas de temps d'une seconde .....	100
Figure 5-18 Analyse de sensibilité du coefficient de Manning pour le modèle du réservoir Gouin à un pas de temps d'une seconde .....	101
Figure 5-19 Analyse de sensibilité du coefficient de diffusion de la turbulence du modèle de Gouin à un pas de temps d'une seconde .....	102
Figure 5-20 Choix du pas temps en fonction du temps de calcul réel et du nombre d'itérations requises par le solveur numérique pour atteindre la convergence – Modèle Gouin à 236 000 nœuds .....	103

Figure 5-21 Courant en état permanent dans le réservoir Gouin près du limnimètre Sud-Ouest pour un vent constant de 20 km/h provenant de l'Ouest – Système de coordonnées UTM zone 18 avec un datum NAD83 .....	104
Figure 5-22 Courant en état permanent dans le réservoir Gouin près du limnimètre amont pour un vent constant de 20 km/h provenant de l'Ouest – Système de coordonnées UTM zone 18 avec un datum NAD83 .....	105
Figure 5-23 Vitesses maximales atteintes par les courants durant la phase transitoire de la simulation pour le réservoir Gouin.....	106
Figure 5-24 Données de forçage du modèle de Gouin pour le mois de juillet 2012 pour les simulations de calibration.....	108
Figure 5-25 Courant de la condition initiale de Gouin près du limnimètre Sud-Ouest – Système de coordonnées UTM zone 18 avec un datum NAD83 .....	109
Figure 5-26 Courant de la condition initiale de Gouin près du limnimètre amont – Système de coordonnées UTM zone 18 avec un datum NAD83 .....	109
Figure 5-27 Simulation de calibration de Gouin pour la période de 2012/07/01 à 2012/07/31...	112
Figure 5-28 Estimation par simulation en système fermé de l'incertitude de l'apport naturel due à l'effet du vent pour le mois de juillet 2012 à Gouin .....	113
Figure 6-1 Explication de l'hypothèse pour laquelle la modélisation de l'effet de vent peut être améliorée en considérant le niveau d'exploitation – Adapté de (Baird & Associates, 2000) .....	117
Figure 6-2 Effet bénéfique escompté pour la performance de la modélisation de l'effet du vent sur les réservoirs lorsque le niveau d'exploitation est considéré dans la modélisation .....	118
Figure 6-3 Procédure pour rendre les différences de niveaux observées en système fermé sans écoulement d'eau.....	120
Figure 6-4 Estimation de l'incertitude d'apport naturel journalier pour un vent de 0° à 26 km/h avec un coefficient de traînée de $1.0 \cdot 10^{-3}$ .....	126
Figure 6-5 Estimation de l'incertitude d'apport naturel journalier pour un vent de 45° à 26 km/h avec un coefficient de traînée de $1.0 \cdot 10^{-3}$ .....	127

Figure 6-6 Estimation de l'incertitude d'apport naturel journalier pour un vent de 90° à 26 km/h avec un coefficient de traînée de $1.0 \cdot 10^{-3}$ .....	128
Figure 6-7 Estimation de l'incertitude d'apport naturel journalier pour un vent de 135° à 26 km/h avec un coefficient de traînée de $1.0 \cdot 10^{-3}$ .....	129
Figure 6-8 Estimation de l'incertitude d'apport naturel journalier pour un vent de 180° à 26 km/h avec un coefficient de traînée de $1.0 \cdot 10^{-3}$ .....	130
Figure 6-9 Estimation de l'incertitude d'apport naturel journalier pour un vent de 225° à 26 km/h avec un coefficient de traînée de $1.0 \cdot 10^{-3}$ .....	131
Figure 6-10 Estimation de l'incertitude d'apport naturel journalier pour un vent de 270° à 26 km/h avec un coefficient de traînée de $1.0 \cdot 10^{-3}$ .....	132
Figure 6-11 Estimation de l'incertitude d'apport naturel journalier pour un vent de 315° à 26 km/h avec un coefficient de traînée de $1.0 \cdot 10^{-3}$ .....	133
Figure 6-12 Mise à jour des RNP à une variable explicative pour estimer les différences de niveaux entre les instruments Sud-ouest et baie de Kikendatch (amont) du réservoir Gouin .....	138
Figure 6-13 Mise à jour des RNP à une variable explicative pour estimer les différences de niveaux entre les instruments Nord et centrale (amont) du réservoir Outardes 4 .....	139
Figure 6-14 RNP à deux variables explicatives pour estimer les différences de niveaux entre les instruments Sud-ouest et baie de Kikendatch (amont) du réservoir Gouin.....	141
Figure 6-15 RNP à deux variables explicatives pour estimer les différences de niveaux entre les instruments Nord et amont du réservoir Outardes 4 .....	142
Figure 6-16 RNP à deux variables explicatives pour estimer les différences de niveaux entre les instruments Sud et amont du réservoir Outardes 4 .....	143
Figure 6-17 RNP à deux variables explicatives pour estimer les différences de niveaux entre les instruments Sud et Nord du réservoir Outardes 4 .....	144
Figure 6-18 Zone d'emplacement optimal d'un troisième limnimètre pour le réservoir Gouin déterminée en considérant une méthode de combinaison arithmétique et deux formulations du coefficient de traînée du vent .....	148

Figure 6-19 Régression non paramétrique de la réponse du limnimètre Baie de Kikendatch (amont) du réservoir Gouin sous l'influence d'un vent horaire .....	151
Figure 6-20 Régression non paramétrique de la réponse du limnimètre Sud-ouest du réservoir Gouin sous l'influence d'un vent horaire .....	152
Figure 6-21 Régression non paramétrique de la réponse du limnimètre amont du réservoir Outardes 4 sous l'influence d'un vent enregistré aux 15 minutes.....	153
Figure 6-22 Régression non paramétrique de la réponse du limnimètre Nord du réservoir Outardes 4 sous l'influence d'un vent enregistré aux 15 minutes.....	154
Figure 6-23 Régression non paramétrique de la réponse du limnimètre Sud du réservoir Outardes 4 sous l'influence d'un vent enregistré aux 15 minutes .....	155
Figure 7-1 Modélisation de la réponse au limnimètre amont causée par les manœuvres hydrauliques de la centrale Outardes 4 .....	162
Figure 7-2 Modélisation de la réponse au limnimètre amont causée par les manœuvres hydrauliques de l'évacuateur de crues du réservoir Gouin .....	163
Figure 8-1 Erreur maximale d'apport naturel selon différents pas de temps du bilan hydrique pour le réservoir Gouin durant le mois de juillet 2012.....	166
Figure 8-2 Erreur maximale d'apport naturel selon différents pas de temps du bilan hydrique pour le réservoir Outardes 4 durant le mois d'octobre 2010 .....	167
Figure 8-3 Comparaison de l'erreur maximale absolue d'apport naturel entre les réservoirs Gouin et Outardes 4.....	168
Figure 8-4 Plage permise pour la pondération variable du limnimètre amont du réservoir Outardes 4 entre les mois de mai et juin.....	176
Figure 8-5 Correction d'un effet de vent observé entre le 19 juillet et le 21 juillet 2007 au réservoir Outardes 4 .....	179
Figure 8-6 Correction de l'effet de deux manœuvres hydrauliques effectuées entre le 29 et le 31 août 2007 au réservoir Outardes 4.....	180

Figure 8-7 Correction d'un effet de vent observé entre le 12 septembre et le 17 septembre 2007 au réservoir Outardes 4 .....	181
Figure 8-8 Correction d'un effet de vent observé entre le 16 et le 22 août 2008 au réservoir Gouin .....	182
Figure 8-9 Correction d'un effet de vent observé entre le 24 et le 28 mai 2012 au réservoir Gouin .....	183
Figure 8-10 Correction d'un effet de vent observé entre le 28 septembre et le 1 <sup>er</sup> octobre 2008 au réservoir Gouin.....	184
Figure A2-1 Mise à jour des RNP à une variable explicative pour estimer les différences de niveaux entre les instruments Sud - Nord -- Outardes 4 .....	207
Figure A2-2 Mise à jour des RNP à une variable explicative pour estimer les différences de niveaux entre les instruments Sud - Centrale -- Outardes 4.....	208

## LISTE DES SYMBOLES

La liste des symboles présente, dans l'ordre alphabétique, les symboles utilisés dans le mémoire ainsi que leur signification.

$A_n$	Apport naturel journalier
$A_p$	Apport naturel journalier prévu
$A_{accessible}$	Aire du lac non influencée par la topographie environnante
$A_{lac}$	Aire totale du lac
$A_i$	Aire du polygone de Thiessen du limnimètre $i$
$A_{tot}$	Superficie totale du lac/réservoir
$C_d$	Coefficient de traînée du vent
$c_t$	Célérité de l'onde de translation
$D$	Diamètre du lac en supposant que $A_{lac}$ est circulaire
$D_{AB}$	Distance entre les limnimètres A et B
$D_j$	Distance entre le limnimètre $j$ et le centre de masse du réservoir
$dH_t$	Variation du niveau d'eau amont au temps $t$
$dQ_t$	Variation de débit sortant au temps $t$
$E$	Évaporation du réservoir durant $\Delta t$
$F_{AB}$	Longueur de l'axe du lac sous le vent entre les limnimètres A et B
$F_x$ et $F_y$	Efforts du vent transmis dans les équations de mouvement
$F_{emmag}$	Courbe d'emménagement du réservoir d'intérêt qui permet de convertir le niveau combiné en volume d'eau stocké.
$f$	Paramètre de Coriolis
$G$	Méthode de combinaison permettant de combiner les $L$ pour obtenir un niveau combiné $N_c$ .
$g$	Accélération gravitationnelle

$\Delta H_{AB}$	Dénivellation due au vent ou la différence de niveau entre les limnimètres A et B. ( $L_A - L_B$ )
$h$	Profondeur d'eau OU unité de temps horaire
$h_m$	Profondeur maximale du lac.
$h_1$ et $h_2$	Profondeur d'eau initiale et la profondeur d'eau causée par l'onde de translation
$i$ et $j$	Compteur de limnimètre incrémental incluant ou non le limnimètre amont
$\kappa$	Constante de Von Karman dont la valeur numérique est généralement de 0,4
$L$	Niveau enregistré par un limnimètre situé sur le réservoir d'intérêt
$\Delta L_{i,t}$	Variation du niveau mesuré au limnimètre $i$ au temps $t$ ( $L_{i,t} - L_{i,t-1}$ )
$m$	Nombre de nœuds du lac
$N_c$	Niveau combiné correspondant à une représentation du niveau horizontal moyen du réservoir d'intérêt
$N_{cm,t}$	Niveau combiné calculé avec les pondérations variables $w_{amont}$ et $w_i$ à la journée $t$
$\Delta N_c$	Variation du niveau combiné
$n$	Nombre de limnimètre sur le réservoir d'intérêt OU la taille l'échantillon d'une série temporelle
$PR$	Précipitation qui tombe directement dans le réservoir d'intérêt durant $\Delta t$
$p$	Paramètre de lissage de la régression non paramétrique défini entre 0 et 1
$\rho_{air}$ et $\rho_{eau}$	Densité de l'air et de l'eau
$\phi_{vent}$	Angle entre la direction du vent et la direction locale du tronçon de rivière
$Q_R$	Débit des affluents non régulés, de la fonte des neiges et du ruissellement de surface qui alimente le réservoir d'intérêt durant $\Delta t$
$Q_{AM}$	Débit régulé entrant dans le réservoir d'intérêt provenant d'un réservoir amont durant $\Delta t$
$Q_{AV}$	Débit régulé sortant du réservoir d'intérêt durant $\Delta t$

$Q_p$	Débit des pertes par infiltration incluant les fuites à travers les ouvrages hydrauliques durant $\Delta t$
$Q_s$	Débit qui représente l'écoulement souterrain entrant dans le réservoir pendant $\Delta t$
$R_{amont,cr,t}$	Réponse associée à l'épisode de vent critique au limnimètre amont pour le pas de temps $t$
$R_{amont,h}$	Réponse causée par le vent au limnimètre amont du réservoir étudié durant l'heure $h$
$R_{c,cr,t}$	Réponse combinée critique pour le pas de temps $t$
$R_{c,h}$	Réponse combinée à l'heure $h$
$R_{c,min}$	Réponse combinée minimisée
$R_{i,cr,t}$	Réponses associées à l'épisode de vent critique pour les limnimètres $i$ le pas de temps $t$
$R_{i,h}$	Réponse causée par le vent au limnimètre $i$ durant l'heure $h$
$R_t$	Réponse du vent à un limnimètre au pas de temps $t$ obtenue soit par modélisation hydrodynamique ou par régression non paramétrique
$r_0$	Rayon du lac obtenu par un cercle d'une superficie égale à celle du lac
$r_f$	Coefficient de rugosité du fond du lac.
$S_{carré}$	Opérateur de la somme des carrés de la régression $s$
$S_h$	Source ou siphon d'écoulement
$S_T$	Source ou un siphon de traceur
$S_x$ et $S_y$	Source ou siphon de mouvement. L'effet du vent de même que la force de Coriolis, la friction du fond sont pris en compte dans ce terme
$s$	Spline lissante obtenue par la régression non paramétrique
$\Delta S$	Variation de volume stocké du réservoir d'intérêt durant l'intervalle de temps $\Delta t$
$T$	Concentration des traceurs calculée par TELEMAC

$t$	Unité de temps
$\tau$	Contrainte de vent appliquée sur la surface de l'eau,
$\tau_{vent}$	Contrainte de cisaillement du vent
$\theta_{AB}$	Gisement entre l'axe reliant les limnimètres A et B
$\theta_v$	Angle du vent mesuré à partir du nord géographique
$U_1$ et $U_2$	Vitesse avant et après l'onde de translation
$U_c$	Vitesse moyenne de la masse d'eau
$u, v$	Composantes de vitesse d'écoulement calculées par TELEMAC
$V$	Volume d'eau stocké dans le réservoir d'intérêt
$V_{vent}$	Vitesse du vent
$V_x$ et $V_y$	Composantes de vitesses du vent dans un plan X-Y perpendiculaire
$V_z$	Vitesse du vent mesurée à une hauteur $z$ .
$\bar{V}_5$	Moyenne mobile des volumes stockés sur cinq jours.
$\nu_t$ et $\nu_T$	Coefficients de diffusion de la turbulence pour l'équation de mouvement et de traceur
$W_{str}$	Coefficient de transformation du vent sur terre en vent sur l'eau
$w_{amont,fixe}$	Meilleure pondération fixe du limnimètre amont
$w_{amont}$	Pondération variable optimale pour le limnimètre amont
$w_{borne\ inf,i}$	Borne inférieure de la plage de pondération permise au limnimètre $i$
$w_{borne\ sup,i}$	Borne supérieure de la plage de pondération permise au limnimètre $i$
$w_i$	Pondération attribué au limnimètre $i$
$w_{i,fixe}$	Meilleure pondération fixe du limnimètre $i$
$x, y$	Coordonnées horizontales cartésiennes
$x_i$	Variable explicative de l'observation $y_i$

$x_T$	Longueur du déficit du cisaillement.
$y_i$	Observation ou donnée mesurée
$Z$	Élévation de la surface libre de l'eau
$z_0$	Rugosité de surface

## LISTE DES ANNEXES

ANNEXE 1 CALIBRATION DU MODÈLE HYDRODYNAMIQUE 2D À L'ÉTAT PERMANENT POUR LE RÉSERVOIR GOUIN.....	175
ANNEXE 2 RÉGRESSION NON PARAMÉTRIQUE À UNE VARIABLE EXPLICATIVE – OUTARDES 4 .....	181

## CHAPITRE 1 INTRODUCTION

### 1.1 Mise en contexte et problématique

La gestion optimale des ressources hydriques nécessite la collecte d'une multitude de données. Une donnée très importante pour une gestion efficace d'un complexe hydroélectrique est l'apport naturel. Les apports naturels peuvent être définis comme étant un débit d'eau, exprimé en  $\text{m}^3/\text{s}$ , approvisionnant un lac/réservoir de façon naturelle et non régularisée. La connaissance des apports naturels journaliers  $A_n$  est primordiale pour un gestionnaire de production hydroélectrique. Tout d'abord, ils sont utilisés comme intrants dans une multitude d'études hydrologiques permettant d'effectuer la conception de diverses structures hydrauliques. De plus, à Hydro-Québec, les apports naturels journaliers  $A_n$  sont utilisés comme données de référence pour calibrer un modèle hydrologique déterministe intitulé HSAMI (Bisson, 1979). Ce modèle simule les apports naturels prévus  $A_p$  à partir de données météorologiques telles que la température et les précipitations de pluie et de neige. La calibration de ce modèle consiste à ajuster itérativement 23 différents paramètres explicatifs du cycle hydrologique jusqu'à ce que  $A_p$  soit très près de  $A_n$ . Une fois ce modèle calibré, celui-ci est utilisé afin de prédire les apports journaliers futurs à partir des prévisions météorologiques des jours à venir. Ces apports naturels prévus  $A_p$  permettent de (Haché et al. 2003) :

1. Établir des règles d'opération de réservoir qui assurent la gestion des ressources hydriques de façon optimale tout en considérant la sécurité des ouvrages et leurs contraintes environnementales.
2. Planifier la gestion des réfections et l'ajout d'équipements pour satisfaire la demande électrique.

Dans l'optique d'obtenir des apports  $A_p$  de bonne qualité, les apports  $A_n$  doivent être également de bonne qualité puisqu'ils sont utilisés comme données de référence pour la calibration de HSAMI. Malheureusement, pour certains réservoirs, il est difficile d'obtenir une série d'apports naturels  $A_n$  fiable et de bonne qualité.

En fait, le débit  $A_n$  est fonction de facteurs hydrométéorologiques dont la précipitation directe sur le réservoir, la fonte des neiges, le débit provenant d'affluents non régulés, le ruissellement sur le bassin versant du réservoir, l'évapotranspiration et l'écoulement souterrain.

Afin de le mesurer adéquatement, il serait nécessaire d'instrumenter un bassin versant afin de mesurer en temps réel chaque facteur hydrométéorologique dont il est fonction. Cependant, à cause de la situation géographique du Québec, les principaux réservoirs hydroélectriques de très grande envergure sont situés dans des régions éloignées et difficiles d'accès. Il serait donc extrêmement coûteux et techniquement complexe d'instrumenter à densité suffisante ces bassins versants afin de mesurer adéquatement chacun des paramètres hydrométéorologiques dont est fonction l'apport naturel  $A_n$ .

Afin de pouvoir quantifier les apports naturels  $A_n$  avec une instrumentation réduite, Hydro-Québec effectue des calculs de bilans hydriques opérationnels journaliers. Cependant plusieurs sources d'erreurs peuvent affecter l'équation de bilan hydrique à l'échelle journalière faisant en sorte que le signal d'apport naturel obtenu comporte des fluctuations improbables. Plus il y a de fluctuations improbables, plus le signal d'apport devient bruité et plus il devient difficile de statuer en temps réel sur la valeur de l'apport naturel. La Figure 1-1 présente un signal d'apport naturel calculé par bilan hydrique entaché de différentes erreurs.

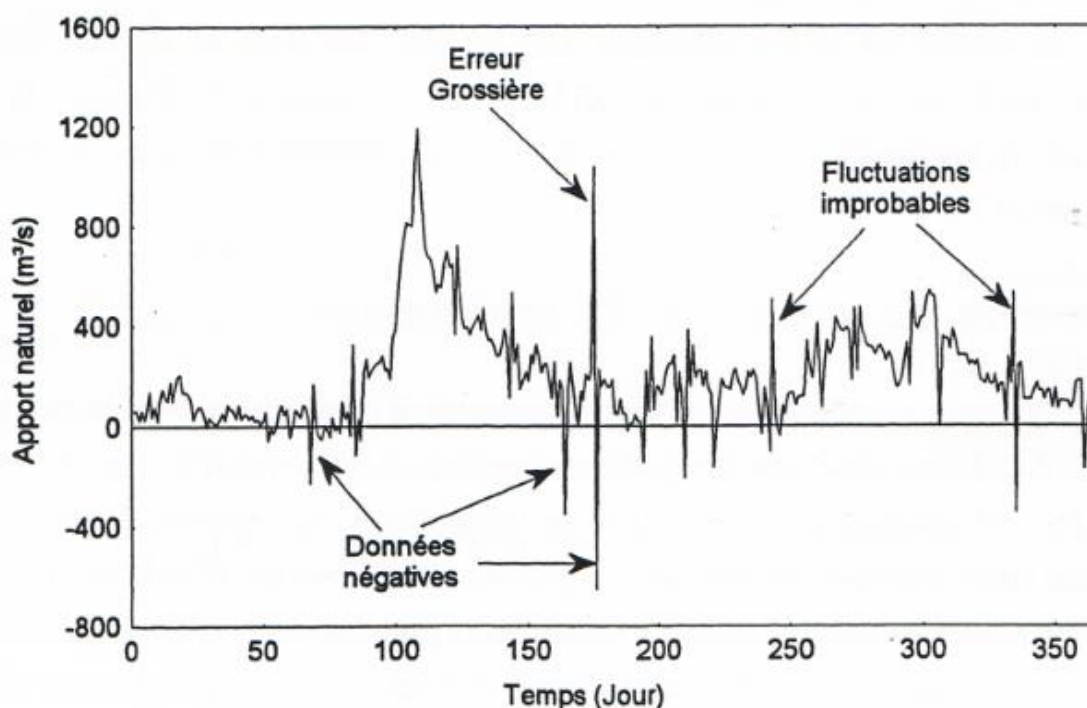


Figure 1-1 Représentation de différentes fluctuations improbables qui affectent le calcul d'apport naturel journalier par bilan hydrique pour le réservoir Baskatong en 1980 - Tiré de (Haché et al. 1996)

Un des intrants de l'équation de bilan hydrique est le niveau d'eau dans le réservoir. Celui-ci est mesuré à chacun des sites par un ou plusieurs limnimètres. Les variations de niveaux enregistrées par les instruments de mesure sont ensuite combinées par un facteur de pondération fixe arithmétique pour obtenir un niveau horizontal moyen. Il a été déterminé que l'effet du vent et des manœuvres hydrauliques reliées à l'exploitation des ouvrages peuvent affecter la lecture des limnimètres pour ainsi fausser le calcul du niveau combiné et par le fait même le calcul d'apport naturel par bilan hydrique (Haché et al., 2003), (Haché et al., 1996), (Croley, 1987), (Bennis, Cote, & Kang, 1996).

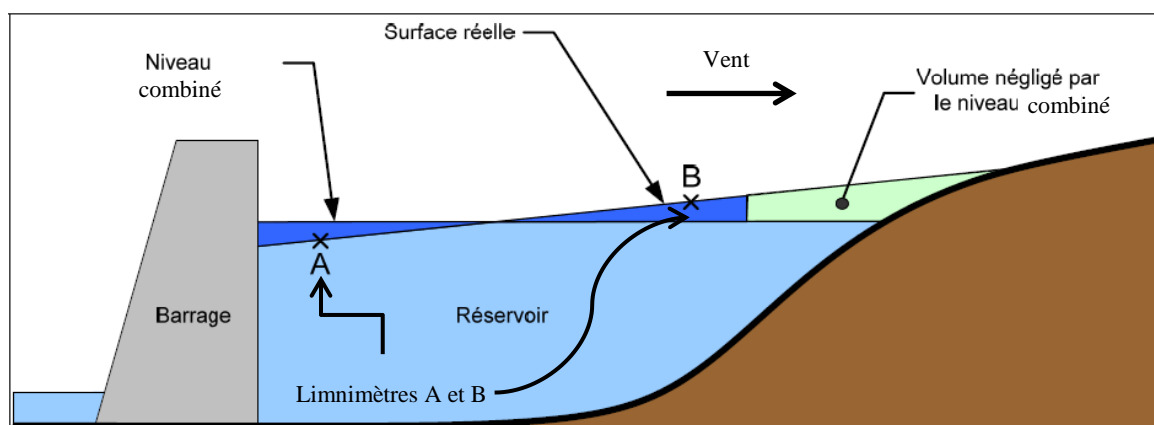


Figure 1-2 Schématisation de l'effet du vent sur l'erreur de volume induite dans le calcul d'apport naturel par bilan hydrique – Adapté d'Alarie (2009)

Dans certains cas, l'effet du vent et des manœuvres hydrauliques peuvent survenir simultanément et affecter significativement les lectures des instruments de mesure. Même une erreur de quelques centimètres enregistrée à un limnimètre peut engendrer une très grande fluctuation d'apport naturel lorsque la superficie du réservoir couvre quelques centaines de kilomètres carrés (Haché et al., 2003). Des lectures de niveaux fiables sont donc essentielles non seulement pour déterminer la réserve énergétique disponible d'un réservoir, mais aussi pour calculer et prévoir le débit qui l'approvisionne (Roy et al., 1992).

On peut observer à la Figure 1-2 que la dénivellation due au vent affecte la lecture des jauges limnimétriques de sorte qu'elles ne représentent plus la surface réelle du plan d'eau. Conséquemment, le niveau combiné devient erroné et le volume d'eau contenu dans le réservoir

n'est pas bien représenté. Afin de minimiser l'erreur de volume d'eau engendrée par l'effet du vent au lac Érié et au lac Supérieur, Croley (1987) a proposé la méthode des estimateurs spatiaux-optimaux. Toutefois, cette méthode considère l'hypothèse simplificatrice que l'effet du vent est symétrique de part et d'autre du lac. De plus, cette méthode n'est applicable qu'à une échelle de temps mensuelle. Ensuite, Haché et al. (2003) ont proposé de modéliser l'effet du vent entre deux limnimètres par régression non paramétrique. Bien que la méthode semble adéquate et performante, rien n'a été mis de l'avant jusqu'à présent pour tenter d'évaluer et/ou corriger l'effet du vent et des manœuvres hydrauliques à court terme sur l'équation du bilan hydrique. Conséquemment, le sujet de ce mémoire se concentre sur l'étude des effets de vent et de manœuvres hydrauliques sur le calcul d'apport naturel journalier par bilan hydrique sur deux réservoirs témoins situés au Québec soit les réservoirs Gouin et Outardes 4.

## 1.2 Objectifs

L'objectif principal de la présente recherche est d'évaluer et de corriger l'effet du vent et des manœuvres hydrauliques dans l'équation de bilan hydrique. Afin d'atteindre cet objectif, il sera nécessaire de modéliser séparément les deux effets étudiés. Lors de cette étude, différentes méthodes de modélisation de l'effet de vent et des manœuvres seront testées et comparées.

Dans un premier temps, puisque le vent crée une force qui peut changer rapidement d'amplitude et de direction, la modélisation hydrodynamique 2D en mode non permanent sera utilisée pour simuler les écoulements sur une période d'un mois où des épisodes de forts vents ont été observés. L'équation du bilan hydrique sera utilisée avec les niveaux d'eau simulés en écoulement non permanent afin d'estimer l'incertitude journalière des apports naturels durant le mois choisi.

Ensuite, la modélisation hydrodynamique 2D et la régression non paramétrique seront utilisées afin de modéliser l'effet du vent sur les réservoirs en supposant un écoulement permanent. L'incertitude des apports naturels sera calculée selon cette hypothèse et comparée à l'incertitude calculée précédemment en écoulement non permanent. De plus, les résultats obtenus par modélisation hydrodynamique seront comparés à ceux obtenus par régression non paramétrique afin de déterminer la méthode de modélisation la plus performante à l'état permanent.

Finalement, une méthodologie pour corriger les erreurs induites dans l'équation de bilan hydrique par les effets étudiés sera proposée. Cette méthodologie sera basée sur la méthode de modélisation en écoulement permanent qui sera jugée la plus adaptée pour être appliquée en temps réel.

En résumé, les objectifs spécifiques de ce mémoire sont :

1. Effectuer une revue de littérature sur les différentes méthodes de modélisation de l'effet du vent et des manœuvres hydrauliques sur les réservoirs ainsi que sur les différents moyens employés pour corriger ces effets sur l'équation de bilan hydrique. (voir Chapitre 2)
2. Modéliser l'effet du vent par modélisation hydrodynamique 2D en condition d'écoulement non permanent sur les réservoirs Outardes 4 et Gouin, dans le but d'estimer l'incertitude journalière de l'effet de vent sur les apports naturels calculés par bilan hydrique (voir Chapitre 5)
3. Modéliser l'effet du vent en condition d'écoulement permanent par régression non paramétrique et par modélisation hydrodynamique 2D pour les réservoirs Outardes 4 et Gouin dans le but de comparer les méthodes de modélisation et d'estimer, en supposant l'écoulement permanent, l'incertitude de l'effet de vent sur les apports naturels calculés par bilan hydrique. (voir Chapitre 6)
4. Modéliser les effets des manœuvres hydrauliques sur le limnimètre amont par régression paramétrique et non paramétrique sur les réservoirs Outardes 4 et Gouin (voir Chapitre 7)
5. Déterminer la meilleure méthode de combinaison à pondération fixe des limnimètres pour le calcul du niveau combiné (voir Chapitre 8)
6. Élaborer une méthode de combinaison à pondération variable des limnimètres pour le calcul du niveau combiné qui est fonction des enregistrements du vent (vitesse et direction), des variations de débit sortant (manœuvres) et de la modélisation des effets du vent et des manœuvres. (voir Chapitre 8)

### 1.3 Organisation du rapport

Ce mémoire est divisé en 9 chapitres.

Le Chapitre 2 présente une revue de la littérature en trois parties. La première partie présente de façon détaillée comment Hydro-Québec utilise l'équation de bilan hydrique pour calculer les apports naturels. La deuxième partie présente les méthodes recensées dans la littérature permettant de modéliser les effets du vent et des manœuvres hydrauliques sur les réservoirs. Finalement, la troisième partie résume les méthodes qui ont été proposées jusqu'à présent pour corriger ces effets sur l'équation du bilan hydrique.

Le Chapitre 3 présente la méthodologie générale du mémoire

Le Chapitre 4 présente les deux études de cas qui seront retenus pour cette recherche en décrivant les sites à l'étude et les données disponibles.

Le Chapitre 5 présente la préparation et la calibration d'un modèle hydrodynamique pour les réservoirs Gouin et Outardes 4. Ensuite, des simulations hydrodynamiques des réservoirs soumis à des vents non permanents sont effectuées en système fermé dans le but d'estimer l'incertitude des apports naturels journaliers calculés par bilan hydrique.

Le Chapitre 6 présente deux méthodes proposées pour modéliser les réservoirs à l'étude soumis à des vents permanents : la modélisation hydrodynamique 2D et la régression non paramétrique. Ces deux méthodes sont ensuite comparées entre elles afin de déterminer celle qui représente le mieux les données historiques. De plus, l'incertitude d'apport estimée en supposant un écoulement permanent est comparée à l'incertitude estimée au Chapitre 5 en écoulement non permanent.

Le Chapitre 7 présente la modélisation de l'effet des manœuvres hydrauliques sur le limnimètre amont situé à proximité de la centrale hydroélectrique ou de l'évacuateur de crues des réservoirs Outardes 4 et Gouin.

Le Chapitre 8 présente la comparaison de différentes méthodes identifiées pour corriger les effets du vent et des manœuvres sur l'équation de bilan hydrique. De plus, une nouvelle méthode est élaborée afin de corriger les effets du vent et des manœuvres en temps réel. Cette méthode est fonction des données du vent enregistrées, du débit sortant calculé au réservoir à

l'étude et des résultats obtenus par certaines méthodes de modélisation présentées aux chapitres 5 et 6.

## CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

### 2.1 Introduction

La recherche dont il est question dans ce mémoire consiste à étudier les effets du vent et des manœuvres hydrauliques sur le calcul d'apport naturel journalier par bilan hydrique. Ainsi, ce chapitre présente une revue de littérature reliée :

1. Au calcul d'apport naturel par l'équation de bilan hydrique tel qu'effectué par Hydro-Québec,
2. Aux méthodes de modélisations de l'effet de vent et des manœuvres hydrauliques sur les réservoirs
3. Aux méthodes disponibles pour corriger ces deux effets sur l'erreur introduite dans l'équation de bilan hydrique

### 2.2 Calcul des apports naturels par bilan hydrique à Hydro-Québec

L'équation du bilan hydrique consiste en fait à appliquer, pour un intervalle de temps déterminé, la loi de la conservation de masse sur un réservoir d'intérêt. Au lieu de mesurer chacune des composantes dont est fonction l'apport naturel, cette équation peut être utilisée comme méthode indirecte pour calculer le débit d'apport naturel qui alimente un réservoir. En fait, Hydro-Québec utilise cette équation pour calculer le débit d'apport naturel à chaque intervalle  $\Delta t$  de 24 heures. La forme générale de cette équation (Haché et al., 1996) est donnée par :

$$\Delta S = PR + Q_R + Q_S - Q_P - E + Q_{AM} - Q_{AV} \quad (2.1)$$

Où,

- $\Delta S$  est la variation de volume stocké du réservoir d'intérêt durant l'intervalle de temps  $\Delta t$
- $PR$  est la précipitation qui tombe directement sur le réservoir d'intérêt durant  $\Delta t$
- $Q_R$  est le débit des affluents non régulés, de la fonte des neiges et du ruissellement de surface qui alimente le réservoir d'intérêt durant  $\Delta t$

- $Q_s$  est le débit qui représente l'écoulement souterrain entrant dans le réservoir pendant  $\Delta t$
- $Q_p$  est le débit des pertes par infiltration incluant les fuites à travers les ouvrages hydrauliques durant  $\Delta t$
- $E$  est l'évaporation du réservoir durant  $\Delta t$
- $Q_{AM}$  est le débit régulé entrant dans le réservoir d'intérêt provenant d'un réservoir amont durant  $\Delta t$
- $Q_{AV}$  est le débit régulé sortant du réservoir d'intérêt durant  $\Delta t$

La Figure 2-1 présente chacun des termes de l'équation (2.1).

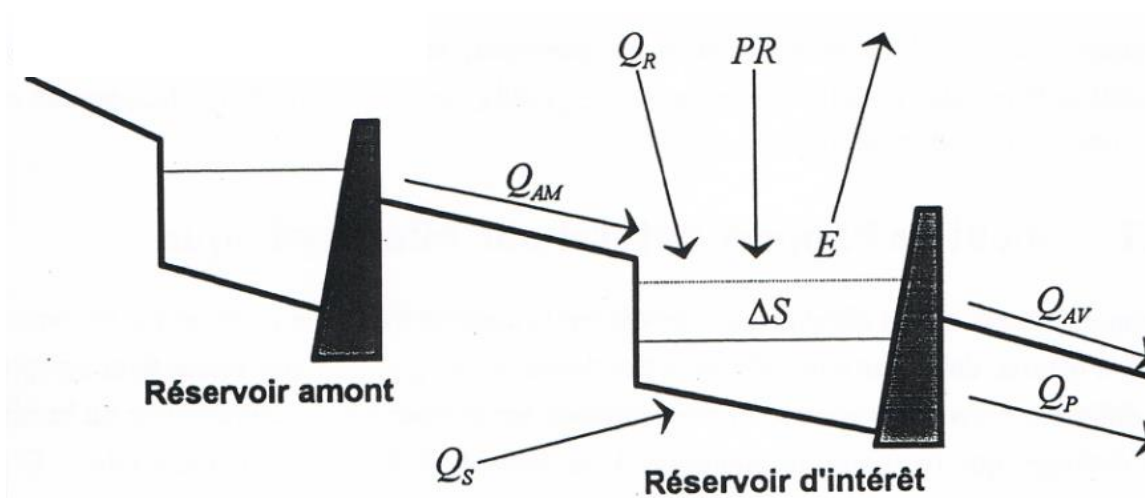


Figure 2-1 Schéma des différents paramètres de l'équation (2.1) – Tiré de Haché et al. (1996)

À cause de la situation géographique et de la taille des différents réservoirs du parc hydroélectrique d'Hydro-Québec, il serait pratiquement infaisable de mesurer directement et avec précision les termes  $PR$ ,  $Q_R$ ,  $Q_s$  et  $E$ . Conséquemment, il est nécessaire d'introduire le concept d'apport naturel  $A_n$  qui se décrit mathématiquement par l'équation suivante en négligeant les pertes :

$$A_n = PR + Q_R + Q_s - E \quad (2.2)$$

En remplaçant l'équation (2.2) dans l'équation (2.1), on obtient

$$A_n = Q_{AV} - Q_{AM} + \Delta S \quad (2.3)$$

L'équation (2.3) est évaluée par Hydro-Québec à minuit, à chaque intervalle de 24 heures pour la majorité de ses réservoirs hydroélectriques. Avec l'instrumentation en place sur chaque réservoir, il est possible pour la compagnie d'estimer chacun des trois termes de cette équation :  $Q_{AV}$ ,  $Q_{AM}$ ,  $\Delta S$

Le calcul de  $Q_{AV}$  est effectué en additionnant le débit turbiné  $Q_T$  à la centrale avec le débit déversé  $Q_D$  à l'évacuateur de crues. Les débits sortants  $Q_T$  et  $Q_D$  ne sont pas mesurés directement. Ils sont plutôt estimés à partir des caractéristiques de la centrale et de l'évacuateur de crues. Plus précisément,  $Q_T$  est fonction de la courbe de rendement des groupes turbine alternateur, du niveau amont, du niveau aval ainsi que de la puissance mesurée à l'alternateur.  $Q_D$  est estimé à partir de la courbe caractéristique de l'évacuateur, de l'amplitude de l'ouverture des vannes et du niveau amont.

Le calcul de  $Q_{AM}$  est effectué de la même façon que pour  $Q_{AV}$ , mais pour le réservoir en amont du réservoir d'intérêt. Cependant, le débit  $Q_{AM}$  n'arrive pas instantanément au réservoir d'intérêt à moins que le réservoir amont soit très proche. L'estimation requiert la prise en considération du temps de cheminement de l'eau dans le tronçon de rivière reliant les deux réservoirs.  $Q_{AM}$  doit donc être laminé.

Le calcul de  $\Delta S$  est effectué par l'équation suivante :

$$\Delta S = V_t - V_{t-1} = F_{emmag}(N_{c,t} - N_{c,t-1}) \quad (2.4)$$

$$N_{c,t} = N_{c,t-1} + G(L_{1,t}, L_{2,t}, L_{3,t}, \dots, L_{n,t} - L_{1,t-1}, L_{2,t-1}, L_{3,t-1}, \dots, L_{n,t-1}) \quad (2.5)$$

Où

- $L$  est le niveau enregistré par un limnimètre situé sur le réservoir d'intérêt
- $n$  est le nombre de limnimètre sur le réservoir d'intérêt

- $G$  est une fonction permettant de combiner les niveaux limnimétriques  $L$  pour obtenir un niveau combiné  $N_c$ . Hydro-Québec utilise actuellement une pondération arithmétique ( $1/n$ ) à chaque instrument.
- $N_c$  est le niveau combiné correspondant à une représentation du niveau horizontal moyen du réservoir d'intérêt
- $F_{emmag}$  est la courbe d'emménagement du réservoir d'intérêt qui permet de convertir le niveau combiné en volume d'eau stocké.
- $V$  est le volume d'eau stocké dans le réservoir d'intérêt

La Figure 2-2 schématise la façon dont sont estimés les trois termes de l'équation (2.3). On peut déduire à partir de cette figure et de cette équation que les enregistrements de niveaux du réservoir d'intérêt sont à la base du calcul d'apport naturel. Il est ainsi plus facile de comprendre que tout facteur externe ou humain, tel que le vent ou les manœuvres, pouvant affecter les jauges limnimétriques vont inévitablement introduire des fluctuations improbables dans le signal d'apport naturel. Étant donné que  $\Delta S$  est directement lié aux jauges limnimétriques, celui-ci est le terme qui est le plus susceptible d'être affecté par l'effet du vent et des manœuvres hydrauliques. De plus, on peut remarquer aux équations (2.4) et (2.5) que le calcul d'apport naturel  $A_n$  ainsi que le calcul d'emménagement  $\Delta S$  sont fonction du pas de temps  $t$  et  $t - 1$ . Ceci implique que toute erreur causée par le vent et/ou manœuvre hydraulique qui affecte le pas de temps  $t$  va inévitablement influencer le bilan hydrique lors du pas de temps de calcul suivant. À ce moment, l'erreur sera comptabilisée au pas de temps  $t - 1$  et sera de signe inverse puisque les variations de niveaux à  $t$  et  $t - 1$  sont soustraites (voir les équations (2.4) et (2.5)).

Le calcul d'apport naturel par bilan hydrique tel qu'effectué par Hydro-Québec est complexe, car il est fonction de plusieurs intrants et de différentes équations. Dépendamment du réservoir d'intérêt, le signal d'apport naturel calculé par bilan hydrique peut alors devenir extrêmement bruité. Il devient donc intéressant de qualifier la qualité d'un signal par l'entremise d'indicateurs de performance. Les différents indicateurs de qualité du signal d'apport trouvés dans la littérature sont disponibles au Tableau 2-1.

Tableau 2-1 Différents indicateurs de performance permettant de juger de la qualité du signal d'apport naturel

<b><u>Nom de l'indicateur de performance</u></b>	<b><u>Formule</u></b>	<b><u>Source</u></b>
« Error index » Indice d'erreur	$E = \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [V_i - \bar{V}_5]^2 \right]^{1/2}$	(Roy et al., 1992)
L'écart type des variations de niveaux combinés	$\sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{1}{n} (N_{c,i} - \bar{N}_c)^2}$	(Haché et al., 2003)
L'écart type des variations d'apport naturel	$\sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{1}{n} (A_{n,i} - \bar{A}_n)^2}$	(Haché et al., 2003)

Où

- $V$  est le volume stocké dans le réservoir
- $\bar{V}_5$  est une moyenne mobile des volumes stockés sur cinq jours.
- $n$  est la taille de l'échantillon

Finalement, afin de juger de la fiabilité du calcul par bilan hydrique, Haché et al. (1996) ont effectué une analyse d'incertitude moyenne sur chacun des trois termes de l'équation soit  $Q_T$ ,  $Q_D$  et  $\Delta S$ . Les incertitudes en  $m^3/s$  affectant chacun des trois termes ont été évaluées à partir du calcul différentiel en considérant les caractéristiques moyennes et constantes des réservoirs (ex : niveau combiné moyen, débit déversé et turbiné journalier moyen). Les auteurs ont conclu que l'incertitude moyenne calculée était grandement sous-estimée et qu'il serait préférable d'effectuer le calcul de l'incertitude en temps réel en prenant en considération les effets du vent et des manœuvres (fermeture/ouvertures des vannes). Cela permettrait ainsi d'évaluer l'évolution de la fiabilité de l'équation du bilan hydrique selon les différentes saisons et situations.

Toutefois, afin d'évaluer l'incertitude causée par les effets du vent et des manœuvres ou de la corriger, il est nécessaire, à priori, de modéliser ces deux effets.

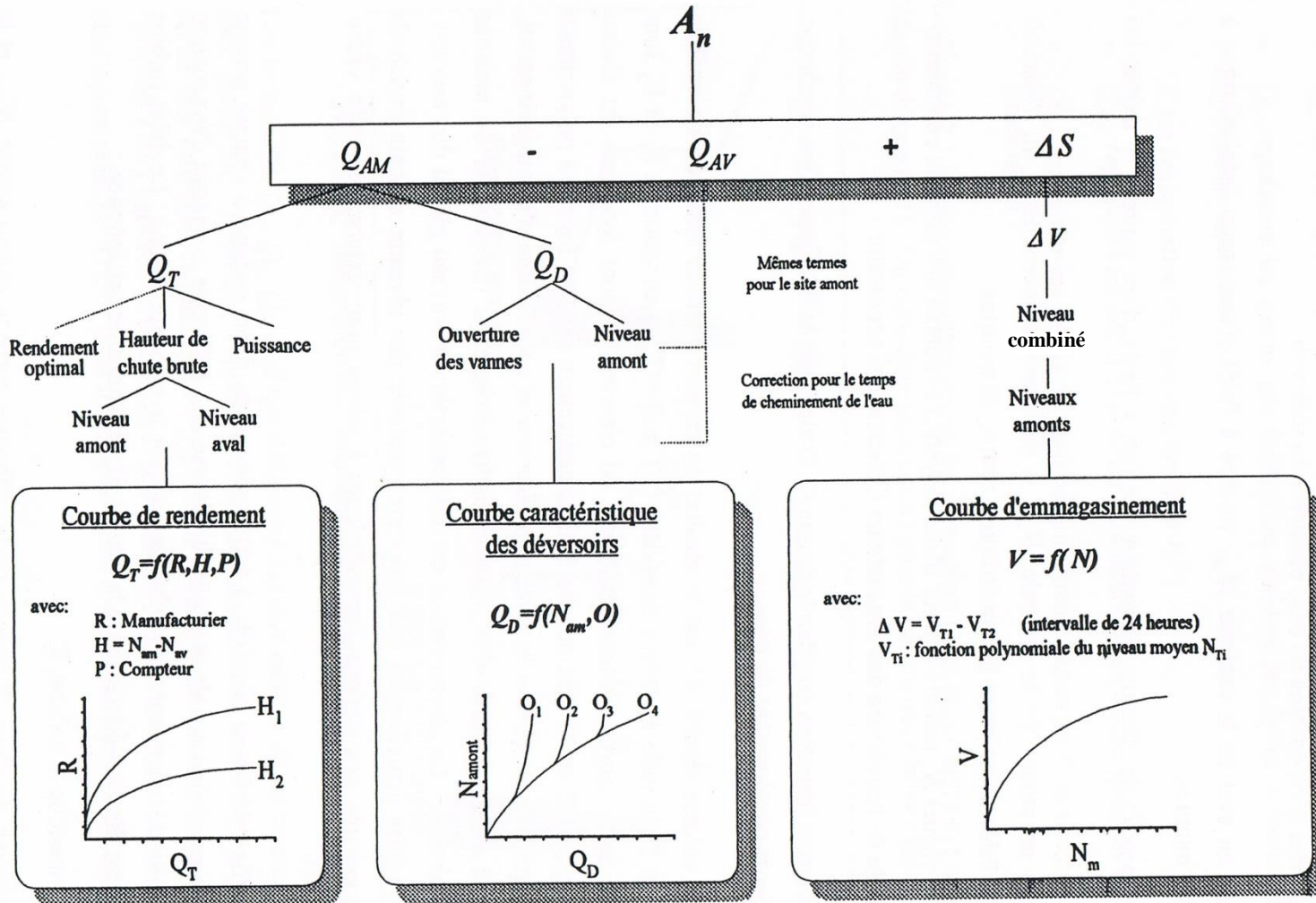


Figure 2-2 Schématisation des intrants pour estimer les trois termes de l'équation de bilan hydrique – Adapté de Haché et al. (1996)

## **2.3 Modélisation de l'effet du vent sur les lacs**

Cette section présente l'effet du vent sur les lacs, les différents paramètres nécessaires pour modéliser cet effet ainsi que les différentes méthodes de modélisation recensées dans la littérature.

### **2.3.1 Effet du vent sur les plans d'eau**

En excluant la génération et la propagation des vagues, l'effet du vent sur les plans d'eau peut être expliqué par deux phénomènes distincts. Le premier phénomène est la dénivellation due au vent (wind set-up). Ce phénomène peut se traduire par un débalancement du plan d'eau généré par l'action d'un vent soutenu. Lorsque les conditions de vent sont permanentes, on peut observer qu'une lecture de limnimètre sous le vent va augmenter alors qu'une lecture de limnimètre face au vent va diminuer (Croley, 1987) (voir la Figure 1-2).

Le deuxième phénomène survient lorsque l'état initial du lac est débalancé par des vents uniformes et qu'ensuite les caractéristiques du vent varient brusquement : soit la direction varie brusquement ou soit la vitesse diminue drastiquement. Généralement, à ce moment, une seiche est déclenchée (voir la Figure 2-3). Une seiche peut être définie comme étant un ensemble de forces inertielles qui agissent pour rétablir le plan d'eau débalancé à son état initial horizontal. Ce phénomène se traduit par un mouvement oscillatoire du plan d'eau jusqu'au retour à l'équilibre (Harris, 1953).

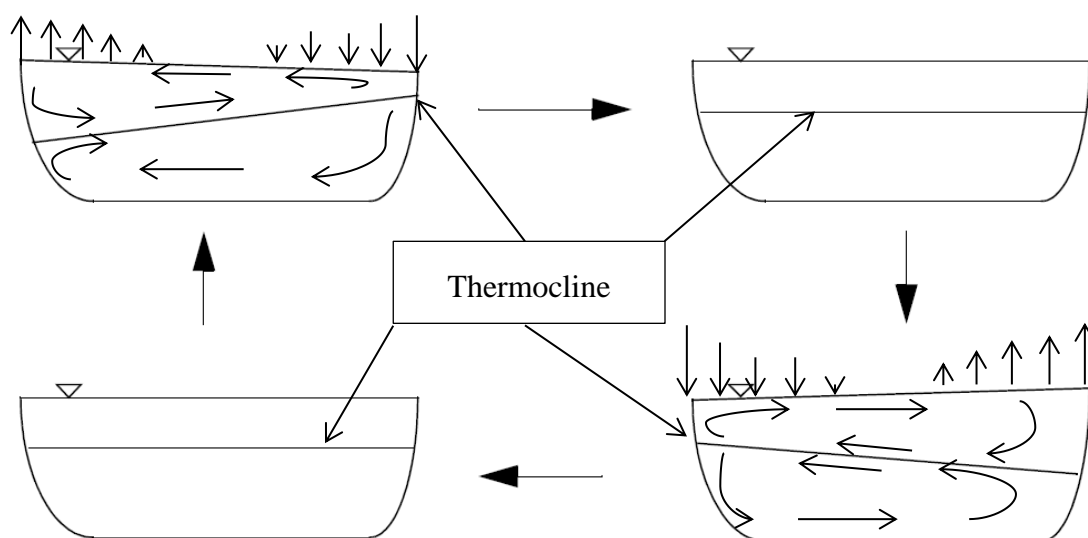


Figure 2-3 Schématisation du phénomène de seiche provoqué lorsqu'une force externe (vent) cesse d'agir sur le plan d'eau – Adapté de (Olsen, 2007)

On remarque à la Figure 2-3 qu'une seiche est constituée de 2 mouvements principaux : mouvement supérieur à la thermocline et le mouvement inférieur à la thermocline. Le mouvement supérieur à la thermocline est qualifié de seiche de surface alors que celui inférieur est appelé seiche interne. Lorsqu'enclenchée, la seiche interne et la seiche de surface provoquent un mouvement oscillatoire à la surface de l'eau qui se produit de façon cyclique selon une période qui varie selon le lac/réservoir étudié et qui s'estompe dans le temps.

Par rapport à l'équation de bilan hydrique, à cause de la dénivellation due au vent et des seiches, les lectures aux jauges limnimétriques sont susceptibles de capter les déformations du plan d'eau qui ne sont pas causées par l'apport naturel. L'effet du vent va donc introduire une erreur dans le terme  $\Delta S$  de l'équation (2.3). Selon Croley (1987) et Haché et al. (2003), l'erreur due au vent introduite dans  $\Delta S$  est donc fonction de :

- La vitesse et la direction du vent
- La forme du réservoir
- Le nombre de limnimètres sur le réservoir d'intérêt
- Le positionnement des limnimètres sur le réservoir d'intérêt

- La méthode de combinaison  $G$  des variations de niveaux mesurés (voir équation (2.3))
- La courbe d'emménagement  $F_{emmag}$  du réservoir d'intérêt (voir équation (2.3))

### 2.3.2 Paramètres de modélisation du vent

En excluant le coefficient de rugosité, les paramètres principaux qui influencent la modélisation des effets décrits à la section 2.3.1 sont le coefficient de traînée du vent, la rugosité de surface, les coefficients de transformation du vent sur terre en vent sur l'eau et le coefficient de diffusion de la turbulence horizontale et verticale (Li et al., 2012).

#### 2.3.2.1 Coefficient du traînée du vent et rugosité de surface

Le paramètre principal pour modéliser la dénivellation due au vent (wind set-up) est le coefficient de traînée du vent  $C_D$ . Ce coefficient permet de déterminer la contrainte du vent appliquée sur une surface d'eau selon l'équation générale suivante (North, 2006) :

$$\tau = C_D \rho_{air} V_z^2 \quad (2.6)$$

Où

- $\tau$  est la contrainte de vent appliquée sur la surface de l'eau,
- $\rho_{air}$  est la densité de l'air
- $V_z$  est la vitesse du vent mesurée à une hauteur  $z$ . Par convention, selon le « World Meteorological Organization » (WMO), cette hauteur est de 10 m à partir du sol.

En fait, le coefficient de traînée du vent peut être défini comme étant une mesure de la rugosité de la surface d'un plan d'eau et est fonction de l'état du plan d'eau (hauteur des vagues et agitation), de la stabilité atmosphérique, de la vitesse du vent (Letchford & Zachry, 2009), de sa direction (Simons & Schertzer, 1989) et de l'intervalle de temps entre deux mesures de vent (Westerink et al., 2008).

De plus, en admettant que l'équation de mouvement descriptive de la dynamique des fluides est appliquée à l'état permanent et que le profil de vitesse du vent à partir du sol suit une tendance logarithmique, il est possible de relier la rugosité de surface d'un plan d'eau au coefficient de traînée du vent (North, 2006) :

$$C_D = \kappa^2 \left( \ln \frac{10}{z_0} \right)^{-2} \quad (2.7)$$

Où

- $C_D$  est le coefficient de traînée du vent
- $\kappa$  est la constante de Von Karman dont la valeur numérique est généralement de 0,4
- $z_0$  est la rugosité de surface

Afin d'obtenir une meilleure modélisation de la dénivellation de surface d'un lac due au vent, il a été déterminé que le choix du coefficient de traînée du vent devrait être variable dans l'espace et dans le temps et qu'il devrait être fonction d'une rugosité de surface variable selon le temps et l'espace. (North, 2006) et (Li et al., 2012).

Cependant, il est fréquent que les données de vent soient limitées à une seule station météorologique nécessitant ainsi d'admettre l'hypothèse de vent uniforme appliqué à toute la surface de l'eau. Afin de simplifier cette problématique et de limiter le nombre de paramètres incertains à définir, il est de pratique courante d'utiliser un coefficient de traînée du vent constant et fixe dans l'espace et dans le temps (North, 2006). Cependant, celui-ci doit être ajusté selon le réservoir étudié. Cet ajustement requiert des mesures de vent (vitesse et direction) et de niveaux pour le lac.

Afin de se délivrer complètement de l'ajustement de ce paramètre, il existe des relations linéaires qui permettent d'obtenir le coefficient de traînée du vent en fonction de la vitesse du vent seulement. Ces relations sont généralement obtenues par régression linéaire (Letchford & Zachry, 2009). Les relations linéaires les plus usuelles sont résumées au Tableau 2-2.

Tableau 2-2 Les relations linéaires les plus usuelles de  $C_D$  en fonction de  $U_{10}$  - Adapté de (Letchford & Zachry, 2009)

Source	$C_D$ ( $\times 10^3$ )	Plage de vitesse du vent (m/s)	Applicabilité
Smith and Banke (1975)	$0.63 + 0.066V_{10}$	2.5-21	Océan et eau peu profonde
Garratt (1977)	$0.75 + 0.067V_{10}$	10-52	Varié
Smith (1980)	$0.61 + 0.063V_{10}$	6-22	Océan
Wu (1980)	$0.80 + 0.065V_{10}$	2-22	Varié
Large and Pond (1981)	$0.49 + 0.065V_{10}$	11-25	Océan
Geernaert (1987)	$0.58 + 0.085V_{10}$	5-25	Varié
Yelland and Taylor (1996)	$0.60 + 0.070V_{10}$	6-26	Océan
Vickers and Mahrt (1997)	$0.75 + 0.067V_{10}$	4-16	Eau peu profonde
Drennan et al. (1999)	$0.60 + 0.070V_{10}$	6-14	Océan

Les relations présentées au Tableau 2-2 ne prennent pas en considération l'effet du fetch, de la durée d'application du vent, du caractère non permanent du vent (Garratt, 1977) et de la traînée du vent supplémentaire amenée par la proximité des berges pour un lac/réservoir (Letchford & Zachry, 2009). Ces limitations font en sorte que la dénivellation due au vent d'un lac/réservoir risque d'être sous-estimée si ces relations sont utilisées.

### 2.3.2.2 Les coefficients de transformation du vent sur terre en vent sur l'eau (wind shelter)

Un anémomètre est un instrument pour mesurer la vitesse du vent. Dépendamment de l'emplacement de cet instrument, les mesures de vitesse du vent peuvent être influencées par des obstructions locales (arbres, bâtiment, clôture, etc.) et/ou par une topographie complexe du terrain environnant (Taylor & Salmon, 1993). Afin de modéliser les écoulements influencés par l'effet du vent dans les lacs/réservoirs, il est de pratique courante d'utiliser un anémomètre situé à un aéroport à proximité lorsqu'il n'y a pas d'instrumentation sur le site à l'étude (Markfort et al., 2010). La particularité des anémomètres aux aéroports est qu'ils ne sont que très peu affectés par les obstructions locales et la topographie environnante (terrain plat). Le fait d'utiliser ces séries de données pour les appliquer à un lac/réservoir qui est parfois entouré d'obstructions locales et/ou d'une topographie complexe peut introduire des erreurs de modélisation.

Les coefficients de transformation du vent sur terre en vent sur l'eau ont pour fonction de corriger les mesures des anémomètres situés en terrain plat afin de prendre en compte les obstructions locales et la topographie aux alentours du lac/réservoir étudié. Il s'agit d'appliquer

un facteur multiplicatif à la vitesse du vent mesurée avec l'objectif de calibrer une simulation sur une observation d'une propriété du lac/réservoir, c.-à-d., la température, le niveau d'eau etc (Markfort et al., 2010).

Afin d'éviter de calibrer ce type de coefficient, il existe des relations simples afin de l'estimer comme celle proposée par Markfort et al (2010) :

$$A_{accessible} = \frac{D^2}{2} \cos^{-1} \left( \frac{x_T}{D} \right) - \frac{x_T}{2} \sqrt{D^2 - x_T^2} \quad (2.8)$$

$$W_{str} = \frac{A_{accessible}}{A_{lac}} = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left( \frac{x_T}{D} \right) - \left( \frac{2x_T}{\pi D^2} \right) \sqrt{D^2 - x_T^2} \quad (2.9)$$

Où

- $W_{str}$  est le coefficient de transformation du vent sur terre en vent sur l'eau
- $A_{accessible}$  est l'aire du lac non influencée par la topographie environnante
- $A_{lac}$  est la surface totale du lac
- $D$  est le diamètre du lac en supposant que  $A_{lac}$  est circulaire
- $x_T$  est la longueur du déficit du cisaillement. La valeur de cette variable est généralement entre 40 à 60 fois la hauteur des obstructions aux alentours du lac/réservoir.

Par l'équation (2.10), il est possible de remarquer que lorsque le lac/réservoir est très grand,  $D \gg x_T$  ce qui donne  $W_{str} = 1$ . L'effet de la couverture des obstacles environnant a donc une influence négligeable si l'aire du lac/réservoir est très grande.

### 2.3.2.3 Coefficient de diffusion de la turbulence

Le coefficient de diffusion de la turbulence permet de modéliser la turbulence reliée à l'écoulement ainsi que le transfert de turbulence entre l'air et l'eau lorsque le vent souffle sur un plan d'eau. Ce coefficient est seulement utilisé pour la modélisation hydrodynamique 2D et 3D (voir section 2.3.4 et 2.3.5). Bien qu'il existe différents modèles complexes pour modéliser la turbulence (k-ε, Elder, Smagorinski etc.), il est possible de seulement ajuster le coefficient de

diffusion de la turbulence horizontale (écoulements 2D et 3D) et verticale (écoulements 3D) (Heinrich et al., 1983).

Ce coefficient se retrouve dans l'équation de mouvement explicative de la dynamique des fluides. Il a une influence importante sur la forme et la taille des recirculations des courants présents dans les écoulements à surface libre 2D/3D. Ce paramètre peut varier entre moins de 1 m<sup>2</sup>/s jusqu'à plus de 500 m<sup>2</sup>/s (Hervouet, 2007).

### 2.3.3 Modélisation hydraulique 1D de l'effet du vent sur les plans d'eau

Les modèles hydrauliques unidimensionnels sont basés sur les équations de Saint-Venant en 1D. Celles-ci sont dérivées des équations de Navier-Stokes moyennées sur la surface de la section transversale ce qui a pour effet de négliger tout mouvement perpendiculaire au sens de l'écoulement. La vitesse et la profondeur d'eau d'un écoulement sont calculées dans une direction unique, longitudinale et imposée. Ce type de modèle permet d'obtenir rapidement une solution aux équations d'écoulement et permet d'inclure facilement différentes structures hydrauliques (John et al., 1995). Les limitations des modèles 1D deviennent importantes lorsqu'il s'agit de simuler un écoulement dans un grand lac, un estuaire ou dans un endroit où la section d'écoulement devient large et/ou complexe (Bekic, Ervine, & Lardet, 2006). Malgré que l'effet du vent soit un phénomène agissant selon trois composantes vectorielles, il est possible d'adapter les modèles 1D pour prendre en compte cet effet météorologique. Il s'agit d'ajouter un terme de frottement de vent à l'équation de mouvement de Saint-Venant. De façon générale, cette contrainte à ajouter s'exprime de façon similaire à l'équation (2.6) par la formulation suivante (Deltares, 2013) :

$$\tau_{vent} = -\rho_{air}C_dV_{vent}^2\cos(\phi_{vent}) \quad (2.10)$$

Où

- $\tau_{vent}$  est la contrainte de cisaillement du vent
- $\rho_{air}$  est la densité de l'air
- $C_d$  est le coefficient de traînée du vent (voir la section 2.3.2.1)
- $V_{vent}$  est la vitesse du vent

- $\phi_{vent}$  est l'angle entre la direction du vent et la direction locale du tronçon de rivière

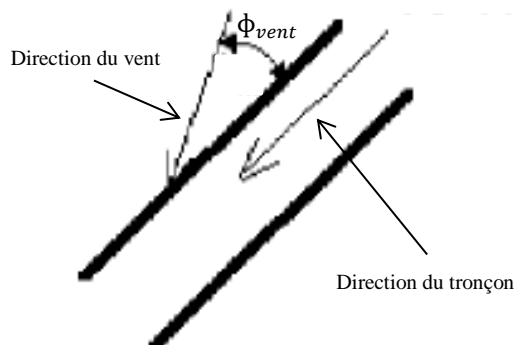


Figure 2-4 Schématisation de l'angle entre la direction du vent et la direction locale du tronçon de rivière  $\phi_{vent}$ , adapté de (Deltares, 2013)

La Figure 2-4 et l'équation (2.10) démontrent que les effets du vent pour les modèles 1D sont appliqués selon la composante longitudinale du vent par rapport à la direction de l'écoulement dans le tronçon.

Différents auteurs ont utilisé la modélisation hydraulique 1D pour simuler l'effet du vent sur des lacs très étroits ( $< 700$  m) et à la jonction entre une rivière et un estuaire. Tout d'abord, John et al. (1995) ont simulé l'effet du vent sur un lac étroit (Long Lake, Nouvelle-Écosse) par la modélisation hydraulique 1D. Leur objectif principal était d'étudier l'impact des variations du niveau d'eau causées par le vent sur l'équation du bilan hydrique. Pour ce faire, un modèle hydraulique 1D a été calibré sur des simulations d'un modèle hydrodynamique 2D pour des épisodes de seiches et de dénivellation due au vent. Les résultats obtenus par la modélisation hydraulique 1D ont été qualifiés de réalistes (voir Figure 2-5) et ont nécessité une fraction du temps de calcul nécessaire pour la modélisation hydrodynamique 2D.

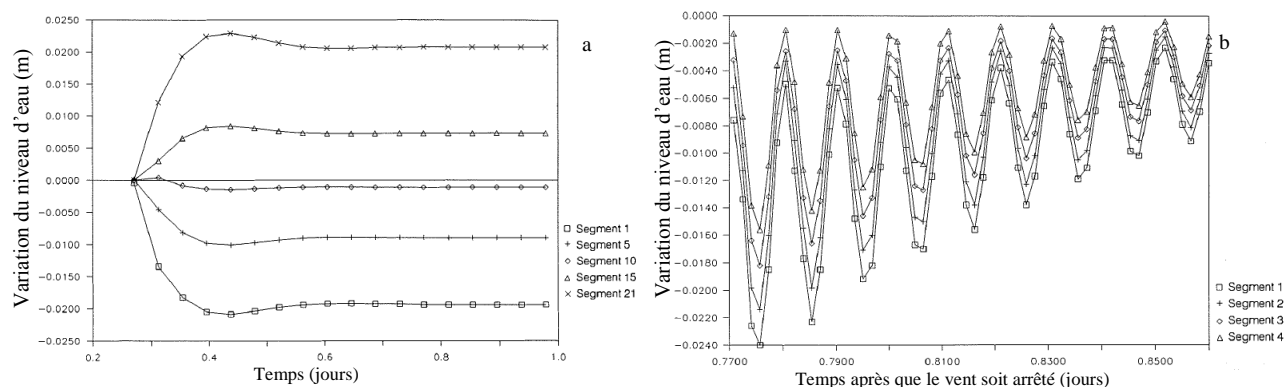


Figure 2-5 Modélisation hydraulique 1D de l'effet du vent sur le lac Long Lake en Nouvelle-Écosse – a : Simulation du niveau d'eau pour des vents constants et uniformes de 15 m/s – b : Simulation du niveau d'eau pendant une seiche causée par l'arrêt d'un vent constant et uniforme de 15 m/s – Adapté de John et al. (1995)

Ensuite, la modélisation hydraulique 1D a été appliquée afin de simuler l'effet du vent durant des épisodes d'inondations aux abords de l'estuaire de Clyde en Écosse (Bekic et al., 2006). Les résultats ont ensuite été comparés à ceux obtenus par modélisation hydrodynamique 2D. Pour les deux modèles, une simulation avec vent uniforme, mais variable temporellement et une simulation sans vent ont été effectuées. Autant pour les modèles 1D que 2D, les niveaux simulés provenant des simulations incluant le vent ont démontré des différences plus faibles par rapport aux niveaux observés. Toutefois, les simulations provenant de la modélisation hydrodynamique 2D ont démontré des résultats plus près des observations que les simulations 1D.

Voici une liste non exhaustive de modèles hydrauliques 1D possédant une fonctionnalité pour inclure l'effet du vent :

- SOBEK (Deltares, 2013)
- MIKE 11 (DHI, 2009)
- FEQ (Franz & Melching, 1997)
- NWS FLDWAV (Fread & Lewis, 1998)

### 2.3.4 Modélisation hydrodynamique 2D de l'effet du vent sur les plans d'eau

La modélisation hydrodynamique en 2D est fondée sur l'hypothèse de pression hydrostatique pour obtenir une vitesse à profondeur moyenne (Cook, 2008). Afin de résoudre les équations de St-Venant, descriptives de la dynamique des fluides, un solveur numérique et l'utilisation de schémas de discrétisation tels que la méthode des éléments finis ou de volumes finis sont à prescrire. De plus, ce type de modèle nécessite un module de pré/post traitement afin de générer un maillage et d'extraire les résultats. Contrairement aux modèles 1D, les modèles 2D calculent les vitesses, les profondeurs d'eau et la direction de l'écoulement dans un plan bidimensionnel. Dépendamment des modèles, les efforts de vent peuvent être appliqués sous forme de conditions frontières ou comme source de mouvement à des nœuds spécifiques du maillage. Avec l'avancée technologique en matière de puissance de calcul, les modèles hydrodynamiques 2D sont de plus en plus accessibles.

Dans la littérature, différents auteurs les ont utilisés pour modéliser l'impact du vent sur les lacs/réservoirs. Tout d'abord, un modèle numérique a été utilisé afin de prévoir les ondes de tempêtes (dénivellation due au vent très prononcée causée par des tempêtes de vent) du lac Érié (Schwab, 1978). Le déplacement des masses d'eau causé par les ondes de tempêtes constitue un risque d'inondation, d'érosion des berges, d'entrave à la navigation et d'entrave aux contraintes de production hydroélectrique d'où l'importance de les prévoir. Le modèle hydrodynamique 2D a été conçu avec objectifs de 1) prendre en considération l'effet bidimensionnel du vent 2) résoudre l'effet du vent et des variations de niveaux horaires 3) être applicable en tout point du lac dans la mesure où d'autres limnimètres seraient installés 4) être fondé sur les concepts de la mécanique des fluides et 5) être facilement applicable en prévision opérationnelle. Afin de remplir ces différents objectifs, le modèle a été fondé sur la fonction de réponse impulsionnelle. Cette méthode consiste à déterminer la réponse unitaire (déplacement unitaire) aux stations de mesure de niveaux causée par une contrainte de vent unitaire ( $1 \text{ dyn cm}^{-2}$ ) appliquée dans un système d'axe X-Y perpendiculaire. L'avantage de cette méthode est qu'elle ne nécessite que deux simulations hydrodynamiques : une simulation avec contrainte unitaire de vent appliquée dans l'axe X pour obtenir la réponse unitaire à l'état permanent dans l'axe X et une autre simulation pour l'axe Y. Ensuite, en effectuant une transposition trigonométrique des vents mesurés et en additionnant les réponses unitaires qui leur sont associées, la réponse totale simulée peut être obtenue à chaque limnimètre pour n'importe quel vent observé sans avoir à effectuer de

simulations hydrodynamiques additionnelles. Le désavantage de la méthode est l'hypothèse que l'effet du vent est symétrique de part et d'autre du lac ce qui est rarement le cas si sa bathymétrie est moins complexe.

La méthode de fonction de réponse impulsionnelle a également été utilisée dans un modèle hydrodynamique pour modéliser la dénivellation due au vent du lac St-Clair (Simons & Schertzer, 1989). L'effet du coefficient de rugosité et de la stabilité atmosphérique sur le coefficient de traînée du vent a été étudié. L'analyse des résultats obtenus a permis de déterminer que la stabilité atmosphérique avait une faible influence sur le coefficient de traînée du vent alors que le choix de la formulation du coefficient de rugosité en avait une très grande.

Ensuite, un modèle hydrodynamique 2D du lac Winnipeg a été utilisé afin d'évaluer la performance de la technique de Manitoba Hydro permettant d'éliminer l'effet du vent sur les lectures de limnimètres (Baird & Associates, 2000). Cette technique est décrite en détail à la section 2.5.3. Afin d'évaluer la performance de cette technique, des simulations d'écoulement non permanent ont été effectuées en système fermé (aucune autre influence que le vent sur le lac) durant deux périodes d'étiage. La technique d'élimination de l'effet de vent a ensuite été appliquée sur les niveaux simulés par le modèle hydrodynamique en système fermé. Étant donné que les niveaux simulés n'étaient affectés que par l'effet du vent, la performance de la technique d'élimination de l'effet de vent a pu être directement évaluée. Ensuite, afin de quantifier l'incertitude de l'effet de vent sur les différentes stations de mesures, des simulations simples en état permanent et vent uniforme en système fermé (aucune autre influence que le vent sur le lac) ont été effectuées pour calculer la dénivellation due au vent selon huit directions de vent alignées avec les 8 points cardinaux principaux pour une vitesse de vent égale à 50 km/h.

La modélisation hydrodynamique 2D est également utilisée pour évaluer l'effet du vent sur les milieux côtiers. Tout d'abord, un modèle mathématique d'éléments finis a été construit pour étudier le régime hydrodynamique global du milieu côtier de Rio de la Plata (Vieira & Lanfredi, 1996). Le modèle a pris en compte les principaux facteurs (débits, vents, vagues) permettant de déterminer le régime d'écoulement d'une rivière affluente. Une analyse détaillée de l'influence du vent sur Rio de la Plata a aussi été effectuée. Ensuite, un modèle 2D par éléments finis a été conçu pour le lagon de Venise (Umgiesser et al., 2004). Après calibration, le modèle a reproduit efficacement le plan d'eau sous des périodes de vents calmes et de vents intenses.

Finalement, une analyse comparative entre la modélisation hydrodynamique 2D et 3D a été effectuée afin de déterminer si l'approximation d'un écoulement 2D influencé par le vent était réaliste (Heinrich et al., 1983). Pour ce faire, un lac d'une bathymétrie idéalisée très simple et un autre avec une bathymétrie plus complexe ont été modélisés en 2D et en 3D sous l'influence d'un vent uniforme et constant dans le temps. Les résultats des simulations ont permis de constater que la circulation des courants du lac et la dénivellation due au vent obtenues avec le modèle hydrodynamique 2D du lac simple étaient identiques au modèle 3D. Pour le lac à bathymétrie plus complexe, de légères différences ont cependant été observées. Les auteurs ont conclu que l'approche en deux dimensions était une approximation valide, mais que pour certaines applications, il serait préférable d'utiliser une discrétisation à trois dimensions. Toutefois, cette affirmation n'est pas une règle générale.

Lorsque le choix est incertain entre une discrétisation en deux ou en trois dimensions, il est préférable de commencer par utiliser une discrétisation en deux dimensions puisque ce type de discrétisation est généralement beaucoup moins gourmand en termes de ressources de calcul. Après analyse des résultats obtenus par un modèle 2D, on peut ensuite conclure s'il est nécessaire d'aller plus loin avec une modélisation 3D.

Voici une liste non exhaustive de modèles hydrodynamiques 2D possédant une fonctionnalité pour inclure l'effet du vent selon les manuels d'utilisateurs :

- ADCIRC 2D (Luettich & Westerink, 2004)
- AdH (Berger et al., 2013)
- MIKE 21 (DHI, 2007)
- RMA2 (Donnell et al., 2006)
- TUFLOW AD (WBM, 2010)
- TELEMAC 2D (EDF, 2010)

### **2.3.5 Modélisation hydrodynamique 3D de l'effet du vent sur les plans d'eau**

Les modèles tridimensionnels résolvent les équations de Navier-Stokes en deux ou trois dimensions (Olsen, 2007). Les modèles entièrement en 3D résolvent les équations de Navier-Stokes dans les trois directions possibles. Ceux-ci sont extrêmement exigeants en ressources de

calculs. Les modèles de moyenne à grande envergure ne peuvent être simulés sur un ordinateur personnel dans un délai raisonnable. Ces modèles nécessitent une discrétisation en trois dimensions du domaine de calcul ce qui permet d'analyser avec précision l'effet de cisaillement du vent, des entrées et sorties d'eau (Neveskiotis et al., 2010), du phénomène de seiche et biens d'autres phénomènes limnologiques de grands lacs ou de domaines côtiers.

Dans la littérature, la modélisation hydrodynamique 3D est souvent utilisée pour résoudre les vitesses de l'écoulement et la profondeur d'eau simultanément avec une autre propriété physique d'un plan d'eau soumis à l'action du vent : transport et mise en resuspension de sédiments (Beletsky et al., 2003), température (Wen-Cheng et al., 2012), (Rueda & Schladow, 2003), (Anyah & Semazzi, 2009), etc), salinité, qualité de l'eau et transport de polluants (Lee et al., 2013).

En utilisant un modèle hydrodynamique 3D, North (2006) a démontré que le choix de formulation du coefficient de traînée et de la rugosité de surface peut grandement affecter la dénivellation due au vent, la circulation, l'amplitude et la période du mouvement de seiche interne et externe. Voici une liste non exhaustive de modèles hydrodynamiques 3D possédant une fonctionnalité pour inclure l'effet du vent selon les manuels d'utilisateurs :

- ADCIRC 3D (Luetlich & Westerink, 2004)
- CH3D-WES (Chapman et al., 1996)
- Delft3D-FLOW (Deltares, 2012)
- ELCOM (Hodges & Dallimore, 2007)
- TELEMAC-3D (EDF, 2013)

### **2.3.6 Formules empiriques**

Les formules empiriques constituent un ensemble de modèles paramétriques simples en état permanent permettant de simuler la dénivellation due au vent. Ce type de modèle incorpore un grand nombre d'hypothèses simplificatrices : forme du lac uniforme, profondeur uniforme, rugosité du fond uniforme, vitesse et direction du vent uniforme sur toute la surface du lac etc (Chimney, 2005). Grâce à leur simplicité, les modèles de ce type sont encore utilisés pour la

conception de structures hydrauliques, la prévision des impacts d'une onde de tempête et d'autres applications d'ingénierie (Chimney, 2005).

Certaines équations empiriques en état permanent tirées de Chimney (2005), de Haché et al. (2003) et de Hsu et al. (1997) sont résumées au Tableau 2-3.

Tableau 2-3 Modèles simples à l'état permanent pour simuler l'effet du vent sur les plans d'eau

Effet modélisé	Équation	Calibration requis	Source
Dénivellation due au vent	$\Delta H_{AB} = K V_{10}^2$	oui	(Hsu et al., 1997)
Dénivellation due au vent	$\Delta H_{AB} = \left( \frac{3.2 \times 10^{-6}}{gh} \right) V_{10}^2 F_{AB}$	non	(USACE, 1955), (Hutchinson, 1957)
Dénivellation due au vent	$\Delta H_{AB} = C_D \left( \frac{\rho_a}{\rho_w} \right) \left( \frac{V_{10}^2}{gh} \right) F_{AB}$	Dépend de la formulation de $C_D$	(Henderson-Sellers, 1984)
Dénivellation due au vent	$\Delta H_{AB} = \left( \frac{c V_{10}^2}{h} \right) F_{AB}$	oui	(USACE, 1977)
Dénivellation due au vent	$\Delta H_{AB} = \frac{w_s^2 r_0}{g} \left( \frac{f}{r_f h_m} \right)^{0.5}$	oui	(Henderson-Sellers, 1984)
Dénivellation due au vent	$\Delta H_{AB} = \frac{a V_{vent}^b F_{AB}}{h}$	oui	(Haché et al., 2003)
Période de la seiche	$T = \frac{2 F_{AB}}{m(gh)^{1/2}}$	non	(Bruce et Clark, 1967)

Où

- $\Delta H_{AB}$  est la dénivellation due au vent ou la différence de niveau entre les limnimètres A et B. ( $L_A - L_B$ )
- $a, b, c, K$  sont des paramètres constants de calibration à ajuster
- $V_{vent}$  est la vitesse du vent

- $g$  est l'accélération gravitationnelle
- $h$  est la profondeur moyenne entre les limnimètres A et B
- $F_{AB}$  est la longueur de l'axe du lac sous le vent (voir Figure 2-6). Cette valeur est donnée par Haché et al. (2003) :

$$F_{AB} = D_{AB} |\cos(\theta_v - \theta_{AB})| \quad (2.11)$$

- $D_{AB}$  est la distance entre les limnimètres A et B
- $\theta_v$  est l'angle du vent mesuré à partir du nord géographique
- $\theta_{AB}$  est l'angle entre l'axe reliant les limnimètres A et B et le nord géographique
- $C_D$  est le coefficient de traînée du vent
- $w_s$  est donné par :

$$w_s = \left( \frac{\rho_a C_D V_{10}^2}{p_w} \right)^{0.5} \quad (2.12)$$

- $r_0$  est le rayon du lac obtenu par un cercle d'une superficie égale à celle du lac
- $f$  est le paramètre de Coriolis
- $r_f$  est le coefficient de rugosité du fond du lac. Ce paramètre est nécessaire lors de la calibration de la relation sur un ensemble de données observées.
- $h_m$  est la profondeur maximale du lac.
- $m$  est le nombre de nœuds du lac



la littérature, il existe différentes méthodes pour effectuer la régression non paramétrique. Une de ces méthodes est la spline lissante qui consiste à minimiser la somme des carrés de la relation suivante (Silverman, 1985) :

$$MIN S_{carré}(s) = MIN p \sum (y_i - s(x_i))^2 + (1 - p) \int \left( \frac{d^2 s}{dx^2} \right)^2 dx \quad (2.13)$$

Où

- $S_{carré}$  est l'opérateur de la somme des carrés de la régression  $s$
- $s$  est la spline lissante obtenue par la régression non paramétrique
- $y_i$  est une observation ou une donnée mesurée
- $x_i$  est une variable explicative de l'observation  $y_i$
- $p$  est un paramètre de lissage défini entre 0 et 1. Ce paramètre doit être sélectionné par l'utilisateur. Il représente un taux d'échange entre l'erreur résiduelle et la variation locale du modèle de régression non paramétrique. En d'autres mots, il s'agit d'un compromis entre la qualité de l'ajustement et le caractère lissant de la régression. Lorsque  $p = 0$ , l'équation (2.14) produit un ajustement linéaire par la technique des moindres carrés. Lorsque  $p = 1$ , l'équation (2.14) produit une spline cubique qui est très sensible aux variations et au bruit des données observées.

D'autres méthodes de régression non paramétrique permettent d'ajuster une surface à un ensemble de données. À ce moment, l'observation  $y_i$  est décrite par deux variables explicatives  $x_i$ . La méthode LOWESS (local weighed scatterplot smoothing) permet de faire ce type d'ajustement (Cleveland, 1979). Cette méthode est également fonction d'un paramètre de lissage variant de 0 à 1.

Dans la littérature, la modélisation non paramétrique de la relation entre les caractéristiques du vent et la différence de niveaux sur les réservoirs Outardes 4 et Gouin a été effectuée par Haché et al. (2003). La variable observée  $y_i$  a été fixée comme la différence de niveau  $\Delta H_{AB,t}$  alors que la variable explicative a été fixée comme étant la direction du vent. La différence de niveau entre le limnimètre A et B s'exprime dans les équations suivantes (Haché et al., 2003) :

$$\Delta N_c = \frac{L_{A,t} + L_{B,t}}{2} - \frac{L_{A,t-1} + L_{B,t-1}}{2} \quad (2.14)$$

$$\Delta N_c = L_{A,t} - L_{A,t-1} + \frac{\Delta H_{AB,t} - \Delta H_{AB,t-1}}{2} \quad (2.15)$$

Où

- $\Delta N_c$  est la variation du niveau combiné calculé par pondération arithmétique pour un réservoir à deux limnimètres
- $L$  est une lecture de niveau d'un limnimètre au pas de temps  $t$
- $\Delta H_{AB,t}$  est la différence de niveau qui s'exprime comme  $L_{A,t} - L_{B,t}$

Par rapport à la formulation des différences de niveaux, il a été déterminé (Haché et al., 2003) que lorsque  $|\Delta H_{AB,t} - \Delta H_{AB,t-1}| \gg 0$ , le calcul d'apport journalier par bilan hydrique peut être significativement affecté. Étant donné que le vent est une force externe qui peut changer de direction et d'intensité rapidement, elle peut faire varier les différences de niveaux  $\Delta H_{AB,t}$  rapidement dans le temps et causer des erreurs importantes dans le signal d'apport naturel journalier. Un exemple d'application de la régression non paramétrique pour modéliser les différences de niveaux en fonction de la direction du vent est présenté à la Figure 2-7.

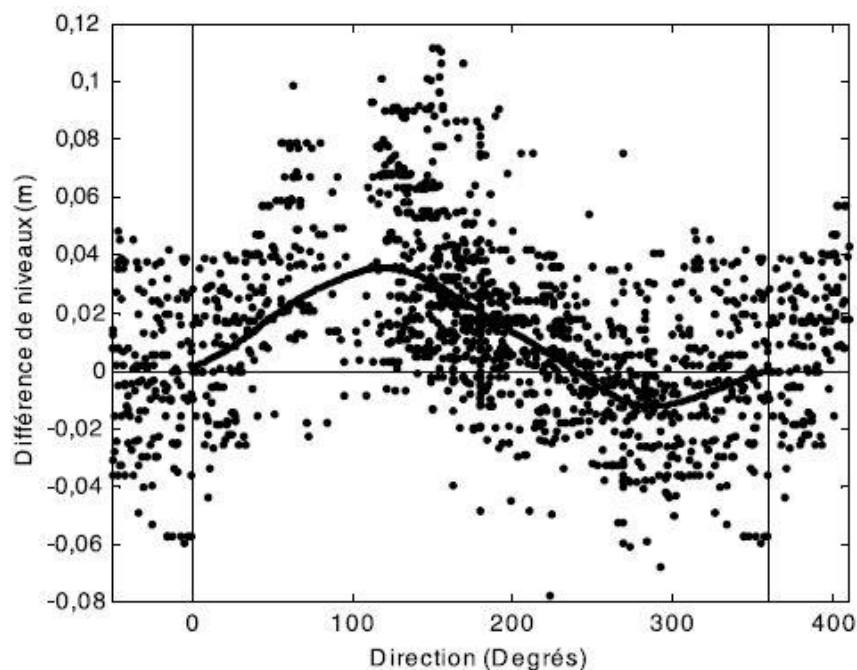


Figure 2-7 Exemple d'application de la régression non paramétrique pour modéliser la différence de niveaux en fonction de la direction pour des vents de 15 km/h au réservoir Gouin – Tiré de (Haché et al., 2003)

Les résultats obtenus entre les différents limnimètres des réservoirs Outardes 4 et Gouin sont présentés à la Figure 2-8. À partir de ces graphiques, on peut déterminer les directions et vitesses du vent pour lesquelles la différence de niveaux  $\Delta H_{AB,t}$  est élevée. Afin d'améliorer la performance de cette technique de modélisation, les auteurs ont suggéré de modéliser l'effet du vent et l'effet des manœuvres hydrauliques (fermeture/ouverture de vanne) indépendamment ainsi que d'introduire la durée du vent dans la modélisation. Toutefois, en raison de la nature de la régression non paramétrique, l'hypothèse d'écoulement permanent doit être admise puisque les forces inertielles (seiches) et l'effet temporel du vent ne peuvent être facilement modélisés avec cette méthode.

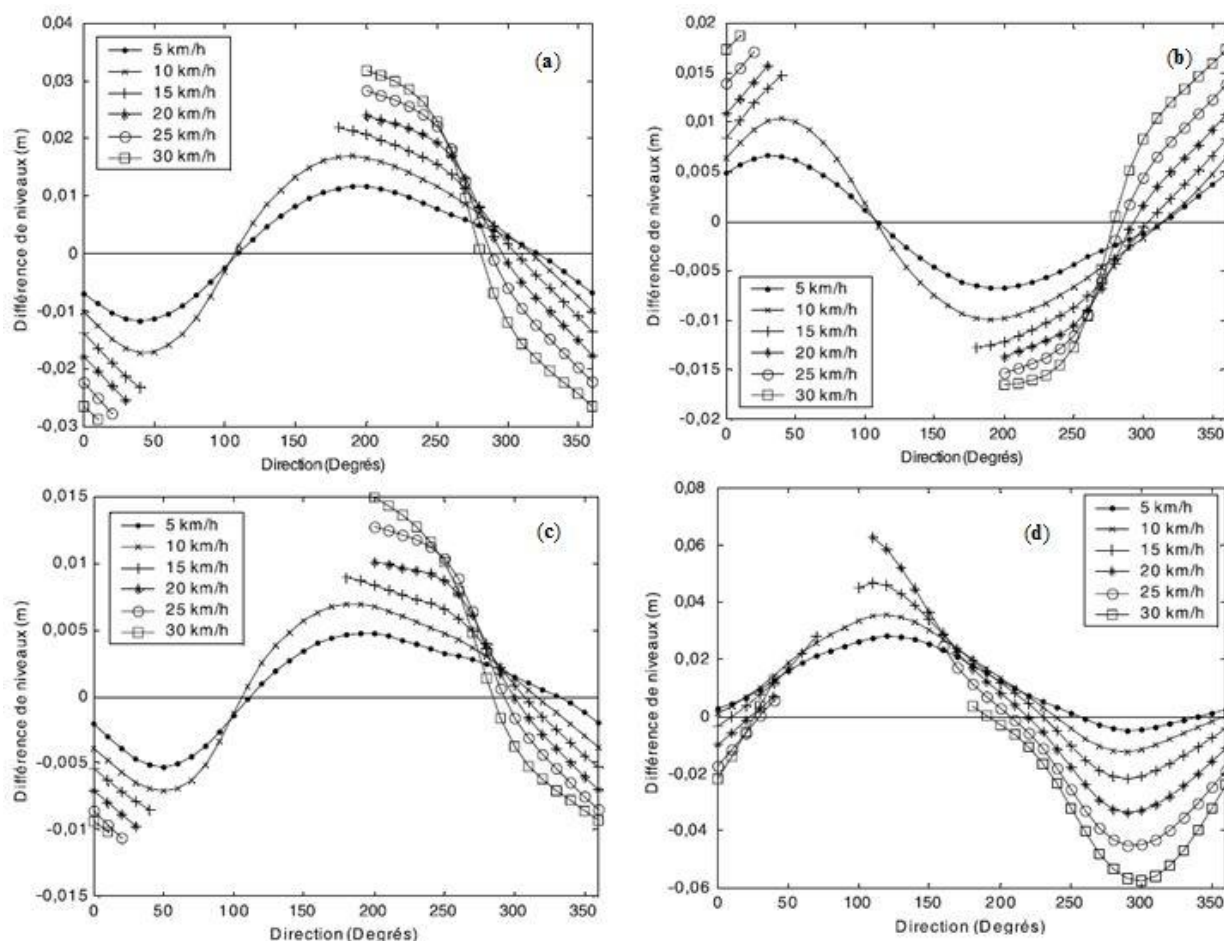


Figure 2-8 Estimation de la différence de niveaux par régression non paramétrique entre les limnimètres des réservoirs Outardes 4 et Gouin pour différentes vitesses et direction de vent : (a) Outardes 4 Nord – Centrale Outardes 4, (b) Outardes 4 Sud – Outardes 4 Nord, (c) Outardes 4 Sud –Centrale Outardes 4 et (d) Gouin Sud-Ouest – Baie de Kikendatch

## 2.4 Modélisation de l'effet des manœuvres hydrauliques

L'effet des manœuvres sur l'instrument de mesure près d'une structure hydraulique peut être expliqué par la notion de l'onde de translation. L'onde de translation consiste en une variation brusque de la surface de l'eau qui est provoquée par une brusque variation de débit  $\Delta Q$  (Graf & Altinakar, 2000). Elle est causée par une fermeture ou une ouverture brusque des vannes d'un évacuateur de crues ou à l'arrêt/démarrage d'un groupe turbine alternateur. Lorsqu'elle se manifeste, l'hypothèse de pression hydrostatique n'est plus admissible et conséquemment, les

équations de la dynamique des fluides de St-Venant ne sont plus valables (Graf & Altinakar, 2000). Lorsqu'une manœuvre hydraulique est effectuée, deux types d'onde de translation sont générés : une onde d'amont et une onde d'aval (voir Figure 2-9).

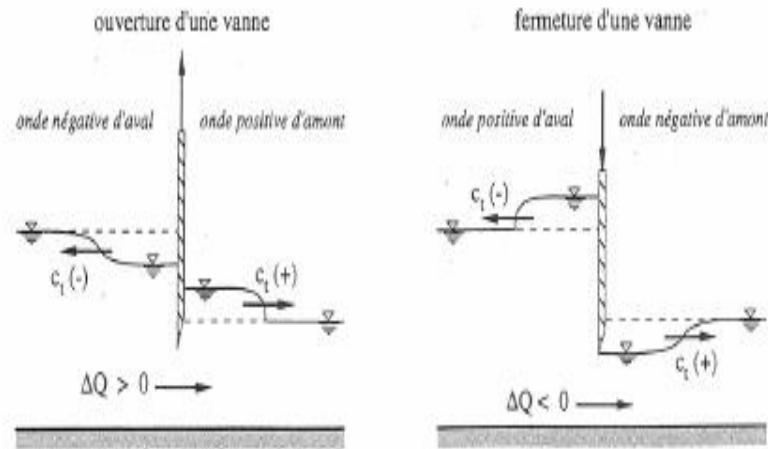


Figure 2-9 Exemple d'onde de translation amont et aval (manœuvre d'une vanne dans un canal) – Tiré de (Graf & Altinakar, 2000)

Lors de l'ouverture d'une vanne, une variation de niveau  $\Delta h$  négative est observée à l'amont alors qu'une variation de niveau  $\Delta h$  positive est observée à l'aval. L'effet contraire se produit lors de la fermeture d'une vanne. Par rapport à l'équation de bilan hydrique, une intumescence causée par l'onde de translation va affecter le terme d'emmagasinement  $\Delta S$  puisque le limnimètre amont va capter une variation de niveau non reliée à l'apport naturel  $A_n$ . De plus, le calcul du débit turbiné  $Q_T$  va être également affecté puisque les limnimètres amont et aval seront affectés par les ondes de translation. Les équations analytiques descriptives de l'onde de translation se propageant dans un canal rectangulaire sont présentées à la Figure 2-10.

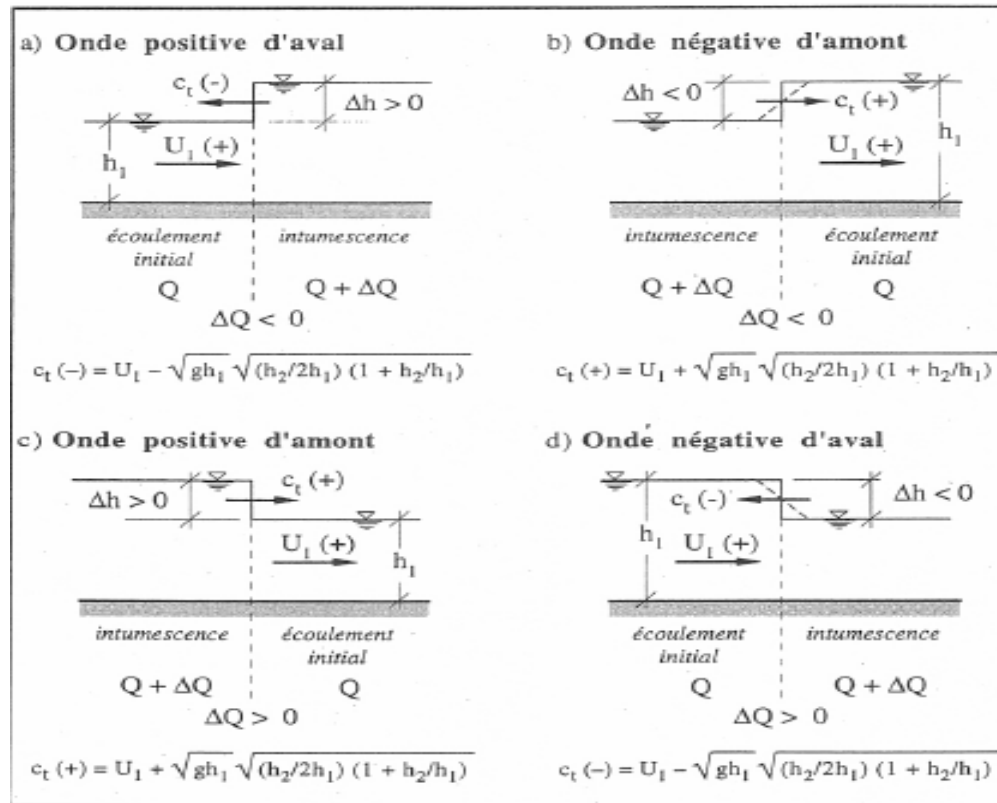


Figure 2-10 Équations descriptives des intumescences dues à une variation brusque de débit –  
 Tiré de (Graf & Altinakar, 2000)

Où

- $c_t$  est la célérité de l'onde de translation
- $h_1$  et  $h_2$  sont la profondeur d'eau initiale et la profondeur d'eau causée par l'intumescence
- $U_1$  est la vitesse initiale
- $g$  est l'accélération gravitationnelle

## 2.5 Correction de l'effet de vent sur les niveaux

Cette section présente les quelques méthodes disponibles dans la littérature permettant de corriger l'effet du vent sur les niveaux d'eau.

### 2.5.1 Choix du pas de temps de l'équation de bilan hydrique

La méthode la plus simple pour corriger les erreurs dues au vent/manœuvres dans le signal d'apport naturel est probablement la sélection d'un intervalle de temps approprié pour le calcul de l'équation de bilan hydrique. Le choix d'un pas de temps plus grand pour le calcul de bilan hydrique va permettre de filtrer les erreurs reliées à la dénivellation due au vent à court terme, aux seiches, aux effets de marées et aux variations temporelles de l'évaporation et de la précipitation (Croley, 1987). Cependant, l'utilisation d'un pas de temps trop élevé a pour conséquence de trop filtrer le signal d'apport naturel. Il y a donc une perte de résolution temporelle de l'information. De plus, il a été déterminé que pour un lac/réservoir, l'incertitude du terme d'emménagement  $\Delta S$  de l'équation du bilan hydrique diminuait au fur et à mesure que le pas de temps du bilan augmentait (Haché et al., 1996).

### 2.5.2 Les méthodes de combinaisons

Lorsque l'équation de bilan hydrique est utilisée sur un réservoir, puisque le terme d'emménagement est calculé à partir d'un seul niveau combiné, l'hypothèse d'horizontalité de la surface de l'eau doit être admise. En raison du mouvement de l'écoulement et des forces externes qui agissent sur les masses d'eau, l'horizontalité du plan d'eau des grands réservoirs ne se produit que très rarement à l'état naturel (Haché et al., 2003). Les méthodes de combinaisons (voir équation 2.5, section 2.2) permettent d'effectuer une moyenne spatiale des variations de niveaux enregistrées à chaque limnimètre d'un réservoir. Cela permet d'obtenir un niveau horizontal moyen représentatif de la surface de l'eau réelle qui peut être utilisé dans l'équation de bilan hydrique. Tout au long de ce mémoire, ce niveau est appelé « niveau combiné »  $N_c$ . Il existe plusieurs méthodes de combinaisons dans la littérature. Il a été déterminé par différents auteurs que le choix de la méthode de combinaison a une grande influence sur l'ampleur de l'erreur introduite dans l'équation de bilan hydrique (Croley, 1987), (Haché et al., 2003), (Zervas, 1997). Cette section présente les méthodes de combinaison les plus communes.

#### 2.5.2.1 Moyenne arithmétique

La moyenne arithmétique est la méthode la plus simple pour calculer la variation du niveau combiné. C'est la méthode qui est actuellement utilisée chez Hydro-Québec. Elle consiste à additionner chaque variation de niveau enregistrée et à diviser cette somme par le nombre total de

jauges limnimétriques. Cette méthode de pondération fonctionne bien lorsqu'il y a suffisamment de limnimètres situés à des emplacements où l'effet du vent se contrebalance de part et d'autre du réservoir. Cependant, en période de fort vent, le débalancement de la surface du lac/réservoir peut causer des erreurs dans le niveau combiné lorsque celui-ci est calculé par une simple moyenne (Zervas, 1997).

### 2.5.2.2 Pondération par inverse de la distance

La pondération par inverse de la distance consiste à attribuer une pondération élevée à un instrument de mesure plus il est près du centre de masse du réservoir et vice versa. Cette méthode peut être programmée par l'équation suivante selon les limnimètres  $i$  et  $j$  :

$$w_i = \frac{\sum_{j=1}^G D_j}{\sum_{j=1}^n D_j} \quad (2.16)$$

Où

- $w_i$  est le poids attribué au limnimètre  $i$
- $D_j$  est la distance entre le limnimètre  $i$  et le centre de masse du réservoir
- $G$  est l'ensemble des limnimètres du réservoir excluant le limnimètre  $i$
- $n$  est l'ensemble des limnimètres du réservoir

### 2.5.2.3 Méthode des polygones de Thiessen

Cette procédure a initialement été développée par les hydrologues pour déterminer la précipitation moyenne sur un bassin versant à partir d'un nombre limité de pluviomètres (Zervas, 1997). Cette méthode consiste à effectuer une moyenne pondérée dont les poids attribués à chaque station sont déterminés en traçant les polygones de Thiessen du réseau d'instrument de mesure. Les polygones sont obtenus en traçant les lignes bissectrices de chaque trait reliant les stations de mesures. Le concept du polygone consiste en une zone pour laquelle tout point à l'intérieur du polygone est plus près de la station à l'intérieur de cette zone que toutes les autres stations à l'extérieur de cette zone (Anctil, Rousselle, & Lauzon, 2012). La pondération attribuée à l'instrument de mesure est obtenue en divisant l'aire du polygone associée à l'instrument par

l'aire totale de la zone d'étude. Cette méthode de combinaison est donc seulement fonction de la géométrie du réseau d'instruments et de la forme du lac/réservoir.

$$w_i = \frac{A_i}{A_{tot}} \quad (2.17)$$

Où

- $w_i$  est le poids attribué au limnimètre  $i$
- $A_i$  est l'aire du polygone de Thiessen du limnimètre  $i$
- $A_{tot}$  est la superficie totale du lac/réservoir

La procédure de pondération de Thiessen a été utilisée pour le calcul du niveau combiné pour la majorité du système hydrique des Grands Lacs de l'Amérique du Nord (Quinn and Todd, 1974).

#### 2.5.2.4 Algorithme des niveaux virtuels

L'algorithme du niveau virtuel a été proposé par Roy et al. (1992). C'est une méthode de combinaison qui attribue des pondérations variables dans le temps à chaque instrument. Le poids accordé à chaque limnimètre dépend de la tendance de la variation de niveau enregistrée observée par rapport à la tendance de variation du niveau virtuel calculé. Pour cette méthode, le niveau virtuel correspond au niveau combiné. La procédure de calcul du niveau virtuel est la suivante (Haché et al., 1996) :

- Calcul de la différence première des niveaux virtuels

$$\Delta N_{c,t-1} = N_{c,t-1} - N_{c,t-2} \quad (2.18)$$

- Calcul des différences premières des niveaux mesurés aux  $n$  stations limnimétriques du réservoir

$$\Delta L_{i,t} = L_{i,t} - L_{i,t-1} \quad \text{où } i = 1, 2, \dots, n \quad (2.19)$$

- Calcul des poids attribués à chacune des mesures des limnimètres :

$$w_{i,t} = \frac{|\Delta L_{i,t} - \Delta N_{c,t-1}|^{-1}}{\sum_{i=1}^n |\Delta L_{i,t} - \Delta N_{c,t-1}|^{-1}} \quad (2.20)$$

- Calcul du niveau virtuel

$$N_{c,t} = N_{c,t-1} + \sum_{i=1}^n (w_{i,t} \Delta L_{i,t}) \quad (2.21)$$

### 2.5.3 La technique de Manitoba Hydro

La technique de Manitoba Hydro s'intitule *niveau d'eau éliminé du vent* (Baird & Associates, 2000). La première étape consiste à calculer le niveau combiné qui consiste en une moyenne pondérée des différents niveaux journaliers moyennés captés par les limnimètres du lac Winnipeg. La pondération est fonction de l'écart type (ou du bruit) dans les enregistrements de niveaux d'eau pour chaque station de mesure. Plus les mesures d'un instrument sont bruitées, plus sa pondération est diminuée et vice versa.

Une fois le niveau combiné journalier calculé, un processus est utilisé pour limiter la variation du niveau combiné. La variation maximale permise est de 18.2 mm. Le niveau obtenu suite à l'application de ce seuil est connu sous l'abréviation ROCLE «Rate Of Change Limited Elevation». Ensuite, un filtre à deux modes est appliqué selon les conditions suivantes :

- Sur une plage de niveau observé de trois jours, si les niveaux d'eau n'ont pas changé, ont strictement augmenté ou strictement diminué, le niveau obtenu du ROCLE est utilisé pour la journée au milieu de la plage des trois jours.
- Si la valeur au milieu de la plage de niveau de trois jours est supérieure ou inférieure aux valeurs voisines, une moyenne mobile centrale d'une fenêtre de 5 jours est appliquée.

Ce filtre est appliqué 5 fois consécutives pour lisser convenablement les niveaux d'eau. Étant donné que cette méthode dépend des observations moyennées sur plusieurs jours, elle ne peut être appliquée en temps réel. L'application de cette méthode est illustrée à la Figure 2-11.

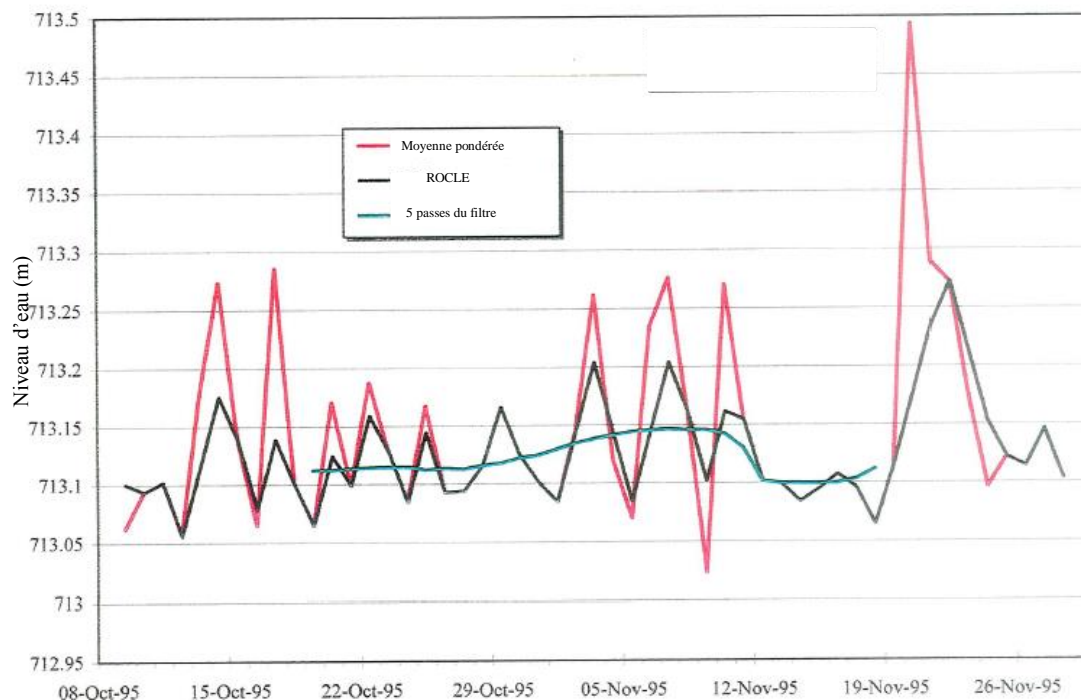


Figure 2-11 Exemple d'application de la méthode de Manitoba Hydro avec les observations du lac Winnipeg – Tiré de (Baird & Associates, 2000)

## 2.5.4 Les estimateurs spatiaux et optimaux de Croley

Croley (1987) est un des premiers chercheurs à avoir étudié l'erreur de vent à long terme (semaine et mois) sur le calcul du niveau combiné. Il a également démontré mathématiquement qu'un minimum de 3 limnimètres est nécessaire sur un lac/réservoir pour espérer éliminer l'erreur due au vent qui affecte les niveaux d'eau. Dans un premier temps, à l'aide d'un modèle hydrodynamique 2D, la dénivellation due au vent a été simulée pour des sollicitations de vents permanents d'amplitude unitaire selon deux plans perpendiculaires (nord – est). Les réponses unitaires simulées pour chaque limnimètre du lac Érié et du lac Supérieur ont été obtenues par ces simulations. Les réponses unitaires obtenues pour chaque limnimètre ont ensuite été combinées par la méthode de Thiessen afin de quantifier l'incertitude du niveau combiné lorsque cette méthode de combinaison est utilisée. Afin de réduire l'incertitude davantage, Croley (1987) propose la méthode des estimateurs spatiaux et optimaux. Selon cette méthode, des pondérations fixes dans le temps sont obtenues par optimisation dans le but de minimiser : 1) les réponses

simulées combinées, 2) les erreurs présentes dans les données observées et 3) les erreurs du modèle hydrodynamique. Cette méthode ne peut être appliquée pour calculer l'incertitude à court terme puisqu'elle ne prend pas en compte l'effet des forces inertielles et des seiches.

## 2.6 Conclusions et recommandations

Le but de cette section est de cibler les concepts mentionnés au cours de la revue de littérature qui seront retenus pour la méthodologie des chapitres ultérieurs. De plus, certains choix qui ont été effectués sont justifiés dans le but d'orienter la méthodologie de ce rapport. Les recommandations sont énoncées selon les principaux sujets de ce chapitre :

### 1. Calcul d'apport naturel par bilan hydrique

- L'équation de bilan hydrique (voir équation 2.3) sera réutilisée à plusieurs reprises dans les chapitres ultérieurs. Cependant, le débit régulé provenant d'un ouvrage amont  $Q_{AM}$  est négligé, car les réservoirs étudiés sont des réservoirs de têtes.
- Pour le calcul de l'équation (2.3) au réservoir Outardes 4, le débit déversé  $Q_D$  est considéré nul puisque l'évacuateur de crues n'est pratiquement jamais utilisé.
- Pour le calcul de l'équation (2.3) au réservoir Gouin, le débit turbiné  $Q_T$  est nul puisqu'il n'y a pas de centrale hydroélectrique.
- La variation de volume emmagasiné  $\Delta S$  est le terme de l'équation de bilan hydrique le plus influencé par l'effet du vent et des manœuvres hydrauliques. Les équations (2.4) et (2.5) seront réutilisés à plusieurs reprises lors de l'estimation de l'incertitude d'apport naturel causée par l'effet du vent et des manœuvres.
- Afin de comparer différentes méthodes de combinaison, l'écart type des variations d'apport naturel (voir Tableau 2-1) sera utilisé comme indicateur de performance pour déterminer la méthode de combinaison la plus appropriée pour chaque réservoir.
- Hydro-Québec utilise la méthode de combinaison par pondération arithmétique pour calculer le niveau combiné. C'est cette méthode de combinaison qui sera prise en considération lors de l'estimation de l'incertitude des apports naturels calculés par bilan hydrique

## 2. Modélisation de l'effet du vent et des manœuvres hydrauliques sur les niveaux d'eau

- Deux phénomènes distinctifs causés par l'effet du vent sur les plans d'eau seront étudiés au cours de ce mémoire : la dénivellation due au vent (wind set-up) et les mouvements oscillatoires des seiches de surface. L'hypothèse d'écoulement permanent est applicable pour étudier la dénivellation due au vent, mais ne l'est pas pour les effets des seiches à l'échelle journalière. Il sera donc nécessaire d'étudier la modélisation en écoulement non permanent et en écoulement permanent.
- Le coefficient de traînée du vent  $C_D$  est un paramètre qui sera largement utilisé lors de la calibration des modèles hydrodynamiques. Afin de limiter le nombre de paramètres à ajuster, la rugosité de surface sera supposée intégrée au coefficient de traînée.
- La formulation du coefficient de traînée du vent de Wu (1980) au Tableau 2-2 sera utilisée puisqu'elle a été élaborée sur des plages de vitesses du vent qui sont comparables à ce qui est mesuré par les anémomètres à Outardes 4 et Gouin.
- Le coefficient de transformation du vent sur terre en vent sur l'eau est supposé égal à 1 puisque les stations de mesure de vent sont installées aux abords des réservoirs à l'étude.
- Le coefficient de diffusion de la turbulence sera utilisé lors de la calibration des modèles hydrodynamiques en écoulement non permanent.
- La modélisation hydrodynamique 2D est retenue pour la méthodologie de ce rapport puisqu'elle est beaucoup moins coûteuse en ressources de calcul que la modélisation hydrodynamique 3D et qu'elle permet d'étudier les effets du vent dans un plan bidimensionnel contrairement à la modélisation hydraulique 1D.
- La méthode des splines lissantes pour la régression non paramétrique à une variable explicative sera utilisée afin de modéliser l'effet du vent sur les différences de niveaux entre les limnimètres et pour modéliser l'effet des manœuvres hydrauliques sur le limnimètre amont.
- La méthode LOWESS pour la régression non paramétrique à deux variables explicatives sera utilisée afin de modéliser l'effet du vent sur les différences de niveaux entre les limnimètres.

### 3. Correction des effets de vent et de manœuvres hydrauliques sur l'équation de bilan hydrique

- Toutes les méthodes de combinaisons présentées dans ce chapitre seront utilisées et expérimentées ultérieurement. Toutefois, la méthode des polygones de Thiessen ne pourra être appliquée au réservoir Gouin puisqu'un minimum de trois limnimètres est nécessaire pour appliquer cette méthode.
- Il serait intéressant d'élaborer une méthode de combinaison à pondération variable pour laquelle les pondérations s'ajustent en fonction du vent enregistré et d'une modélisation de son effet sur les réservoirs.
- La technique de Manitoba Hydro pour éliminer l'effet du vent est seulement applicable en temps différé. Un des objectifs de cette recherche est de développer une méthode applicable en temps réel. Pour cela, la technique de Manitoba Hydro ne sera pas retenue.
- Les estimateurs spatiaux et optimaux de Croley constituent une méthode intéressante, mais seulement applicable pour des effets de vent à long terme (semaines à mois). Puisque l'objet de ce rapport est d'évaluer l'incertitude journalière sur les apports, cette méthode ne sera pas retenue.

## **CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE**

Les conclusions tirées de la revue de la littérature permettent d'orienter la méthodologie générale qui sera appliquée pour le reste de la recherche. La démarche expérimentale est divisée en deux parties principales. Dans un premier temps, il est nécessaire de caractériser l'effet du vent et des manœuvres hydrauliques sur l'équation de bilan hydrique. La méthodologie pour cette caractérisation est présentée à la section 3.1 de ce chapitre. Ensuite, à partir des résultats obtenus par cette caractérisation, des solutions seront expérimentées pour corriger l'équation du bilan hydrique de ces deux effets. La méthodologie pour cette partie est présentée à la section 3.2.

### **3.1 Caractérisation de l'effet du vent et des manœuvres hydrauliques sur l'équation du bilan hydrique**

Avant d'être en mesure de corriger l'équation du bilan hydrique, il est nécessaire de comprendre comment l'effet du vent et des manœuvres hydrauliques affectent les variations de niveau mesurées par les limnimètres. La méthodologie pour caractériser ces deux effets sur la lecture des limnimètres est présentée à la Figure 3-1.

La modélisation hydrodynamique et des méthodes de régressions non paramétriques seront utilisées comme des outils de caractérisation.

Tout d'abord, l'effet du vent sur les limnimètres sera étudié de la façon la plus réaliste possible, c'est-à-dire, par une modélisation en non permanent. Ensuite, le même effet sera étudié par modélisation en supposant un état permanent. Finalement, l'effet des manœuvres hydrauliques sur les limnimètres sera étudié par modélisation en état permanent.

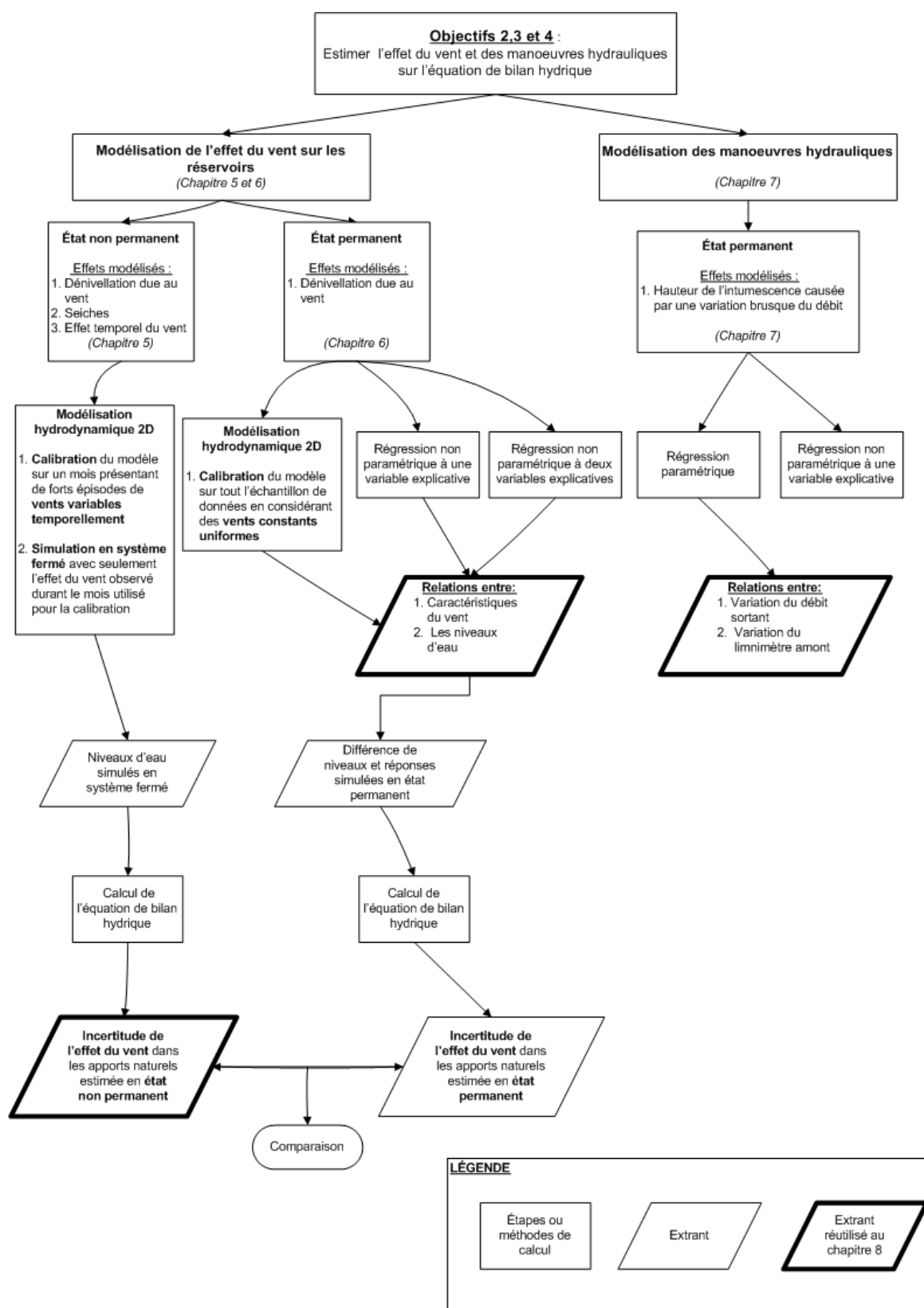


Figure 3-1 Diagramme de procédés de la méthodologie pour les objectifs 2,3 et 4

### 3.1.1 Modélisation de l'effet du vent en écoulement non permanent

La démarche pour cette étape correspond au Chapitre 5 et au deuxième objectif de ce mémoire. Plus spécifiquement, l'objectif de cette partie est de quantifier l'effet du vent sur les mesures de limnimètres et d'estimer l'ordre de grandeur de l'erreur, en  $\text{m}^3/\text{s}$ , qui est introduite dans l'équation du bilan hydrique à cause de cet effet. L'outil principal qui sera utilisé est la modélisation hydrodynamique à l'aide du logiciel TELEMAC 2D. Puisqu'une modélisation en non permanent sera utilisée, différents effets du vent pourront être pris en compte : 1) la dénivellation due au vent, 2) les seiches et 3) l'effet temporel du vent.

Dans un premier temps, un modèle hydrodynamique pour chaque réservoir à l'étude sera élaboré. Ensuite, les modèles seront calibrés sur des observations s'échelonnant sur 1 mois en continu présentant des épisodes de forts vents (30 km/h et plus).

Une fois le modèle calibré, une simulation en système fermé sera effectuée. La caractéristique de cette simulation est qu'elle inclut seulement l'effet du vent sur le réservoir. Les niveaux d'eau simulés seront ensuite utilisés dans un calcul de bilan hydrique. Puisqu'il n'y aucune entrée/sortie d'eau dans le modèle, le calcul d'apport naturel découlant des niveaux d'eau simulés en système fermé correspond directement à l'erreur du bilan hydrique en  $\text{m}^3/\text{s}$  causée par le vent. Cette erreur sera calculée selon une échelle journalière. Toutefois, cette erreur sera réutilisée au Chapitre 8 pour effectuer une analyse de sensibilité pour déterminer comment l'erreur du vent varie en fonction de différent pas de temps de l'équation du bilan hydrique.

### 3.1.2 Modélisation de l'effet du vent en supposant un écoulement permanent

La démarche pour cette étape correspond au Chapitre 6 et au troisième objectif de ce mémoire. Plus spécifiquement, l'objectif de cette partie est de quantifier l'effet du vent sur les mesures de limnimètres en supposant un état permanent. Cette hypothèse fait en sorte qu'il est seulement possible de prendre en compte la dénivellation due au vent dans la modélisation. Toutefois, contrairement à la modélisation en non permanent, la modélisation en permanent a besoin d'être effectué qu'une seule fois dans la mesure où la modélisation couvre toutes les caractéristiques et les conditions du vent qui peuvent être observées au site à l'étude. Les outils principaux qui seront utilisés sont la modélisation hydrodynamique à l'aide du logiciel TELEMAC 2D ainsi que la modélisation par régression non paramétrique. Dans un premier

temps, le modèle hydrodynamique sera calibré en permanent et des régressions non paramétriques seront élaborées. Ensuite, l'erreur du vent dans l'équation du bilan hydrique sera calculée de la même façon qu'il a été expliqué à la section 3.1.1. Finalement, une comparaison de l'incertitude calculée en non permanent et en permanent sera effectuée.

Les relations entre les caractéristiques du vent et la variation des niveaux d'eau établies par la modélisation en permanent seront réutilisées au Chapitre 8. Plus précisément, ces relations seront utilisées pour guider l'attribution d'une pondération variable à chaque limnimètre des réservoirs à l'étude.

### **3.1.3 Modélisation des manœuvres hydrauliques**

La démarche pour cette étape correspond au Chapitre 7 et au quatrième objectif de ce mémoire. Plus spécifiquement, l'objectif de cette partie est de quantifier l'effet des manœuvres hydrauliques sur les variations de niveau d'eau enregistré par les limnimètres près des ouvrages hydrauliques. Les régressions non paramétrique et paramétrique seront utilisées comme outils pour estimer les intumescences générées par les variations brusques de débit sortant près d'une centrale hydroélectrique ou d'un évacuateur de crues.

Les relations entre les variations du débit sortant et les variations des niveaux d'eau au limnimètre amont seront réutilisées au Chapitre 8. Ces relations seront également utilisées pour guider l'attribution d'une pondération variable au limnimètre amont des réservoirs à l'étude.

## **3.2 Correction de l'équation du bilan hydrique**

Les résultats obtenus par la caractérisation de l'effet du vent et des manœuvres hydrauliques sur l'équation du bilan hydrique seront ensuite utilisés pour corriger les erreurs et les fluctuations improbables dans les apports naturels. La démarche Figure 3-2 présente la démarche qui sera employée. Dans un premier temps, l'évaluation du pas de temps optimal du bilan hydrique sera effectuée. Ensuite, différentes méthodes de combinaison par pondération des limnimètres seront expérimentées.

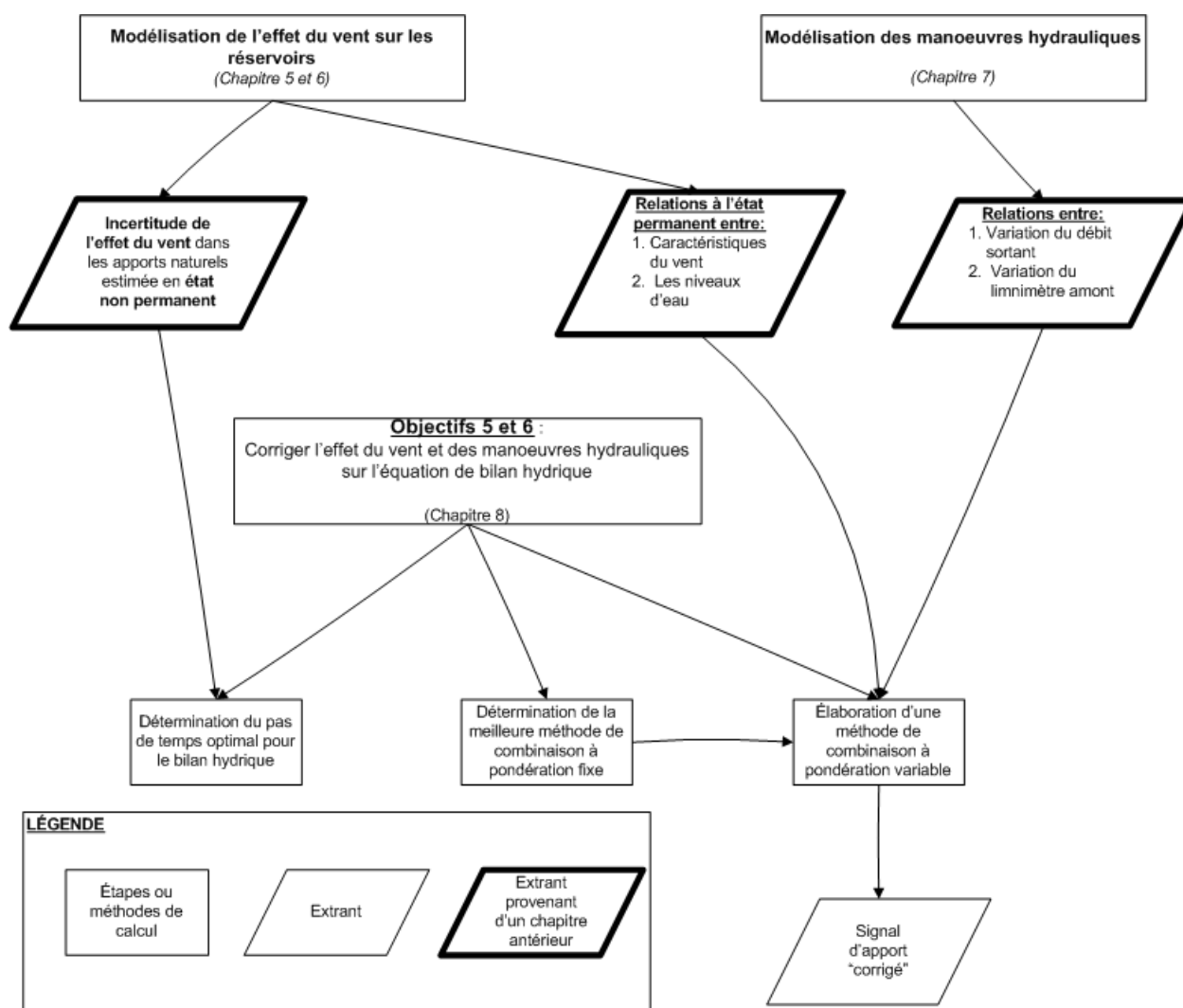


Figure 3-2 Diagramme de procédés de la méthodologie pour les objectifs 5 et 6

### 3.2.1 Évaluation du pas de temps optimal pour le calcul du bilan hydrique

L'utilisation d'un pas de temps journalier pour le calcul du bilan hydrique peut résulter en un signal d'apport très bruité. D'un autre côté, l'utilisation d'un pas de temps trop grand amène une perte d'information et le risque de trop filtrer le signal d'apport. Dans cette section, l'erreur d'apport journalier calculée Chapitre 5 par la modélisation des effets du vent en non permanent sera réutilisée. Afin de déterminer un pas de temps approprié, l'erreur d'apport journalier précédemment calculée sera recalculée selon différents pas de temps du bilan hydrique.

### **3.2.2 Méthodes de combinaison par pondération des limnimètres**

Il est possible de réduire les erreurs du vent dans l'équation du bilan hydrique en attribuant des pondérations différentes aux limnimètres. Dans un premier temps, différentes méthodes à pondération fixe seront expérimentées afin de déterminer la méthode la plus appropriée pour chaque réservoir à l'étude. Ensuite, à partir de la meilleure méthode à pondération fixe et de la modélisation en permanent de l'effet du vent et des manœuvres, une nouvelle méthode de combinaison sera élaborée. Cette méthode consiste à attribuer une pondération variable dans le temps pour chaque instrument.

## CHAPITRE 4 DESCRIPTION DES ÉTUDES DE CAS

### 4.1 Introduction

La démarche expérimentale qui est employée dans ce mémoire est appliquée à deux réservoirs hydroélectriques témoins : Gouin et Outardes 4. Le but de ce chapitre est de fournir une description de ces deux études de cas.

Tout d'abord, le logiciel numérique utilisé dans la démarche est présenté. Ensuite, les réservoirs témoins, leurs données disponibles respectives et la préparation des données bathymétriques sont décrits subséquentement.

### 4.2 Description de TELEMAC-2D

Le système TELEMAC-2D est un modèle numérique constitué d'une série de routines programmées en FORTRAN permettant de résoudre les équations de St-Venant pour étudier les écoulements en rivière, en estuaire et en milieu côtier. Plus précisément, TELEMAC-2D résout simultanément les quatre équations hydrodynamiques suivantes (EDF, 2010) :

$$\text{Continuité} \quad \frac{\partial h}{\partial t} + u\vec{\nabla}(h) + h\text{div}(\vec{u}) = S_h \quad (4.1)$$

$$\text{Mouvement } x \quad \frac{\partial u}{\partial t} + \vec{u}\vec{\nabla}(u) = -g\frac{\partial z}{\partial x} + S_x + \frac{1}{h}\text{div}(hv_t\vec{\nabla}u) \quad (4.2)$$

$$\text{Mouvement } y \quad \frac{\partial v}{\partial t} + \vec{u}\vec{\nabla}(v) = -g\frac{\partial z}{\partial y} + S_y + \frac{1}{h}\text{div}(hv_t\vec{\nabla}v) \quad (4.3)$$

$$\begin{array}{l} \text{Continuité} \\ \text{traceur} \end{array} \quad \frac{\partial T}{\partial t} + \vec{u}\vec{\nabla}(T) = S_T + \frac{1}{h}\text{div}(hv_T\vec{\nabla}T) \quad (4.4)$$

Où

- $h$  est la profondeur d'eau
- $u, v$  sont les composantes de vitesse d'écoulement
- $T$  est la concentration des traceurs
- $g$  est l'accélération gravitationnelle

- $v_t$  et  $v_T$  sont les coefficients de diffusion de la turbulence pour l'équation de mouvement et de traceur
- $Z$  est l'élévation de la surface libre de l'eau
- $t$  est le temps
- $x, y$  sont les coordonnées horizontales cartésiennes
- $S_h$  est une source ou siphon d'écoulement
- $S_x$  et  $S_y$  est une source ou siphon de mouvement. L'effet du vent de même que la force de Coriolis, la friction du fond sont pris en compte dans ce terme
- $S_T$  est une source ou un siphon de traceur

$h, u, v$  et  $T$  sont les inconnues.

La fonction de forçage du vent dans TELEMAC est donnée par la formulation suivante (Hervouet, 2007):

$$F_x = \frac{1}{h} \frac{\rho_{air}}{\rho_{eau}} C_D V_x \sqrt{V_x^2 + V_y^2} \quad (4.5)$$

$$F_y = \frac{1}{h} \frac{\rho_{air}}{\rho_{eau}} C_D V_y \sqrt{V_x^2 + V_y^2} \quad (4.6)$$

Où

- $F_x$  et  $F_y$  sont les efforts du vent transmis dans les équations de mouvement (4.2) et (4.3)
- $\rho_{air}$  et  $\rho_{eau}$  sont la densité de l'air et de l'eau
- $C_D$  est le coefficient de traînée du vent
- $V_x$  et  $V_y$  sont les composantes de vitesses du vent dans un plan X-Y perpendiculaire
- $h$  est la profondeur d'eau

TELEMAC a été développé par EDF-LNHE (*Électricité De France en collaboration avec le Laboratoire National d'Hydraulique et d'Environnement*) qui est une entreprise responsable de la production d'électricité en France et ailleurs à l'international. La résolution des équations de la dynamique des fluides repose sur la méthode des éléments finis. Dans TELEMAC-2D, cette méthode nécessite la discrétisation du domaine à l'étude selon une grille de calcul composée d'éléments finis triangulaires. Afin de générer un maillage couvrant le domaine à l'étude et d'extraire les résultats des simulations numériques, le logiciel BlueKenue est requis. Ce logiciel a été développé par le CNRC (*Conseil National de Recherche du Canada*) et agit à titre de pré/post processeur pour la suite de calcul TELEMAC. En d'autres mots, BlueKenue permet de préparer les fichiers de données bathymétriques et les fichiers de conditions frontières nécessaires pour effectuer des simulations hydrodynamiques avec TELEMAC. De plus, il permet une visualisation 1D, 2D ou 3D des résultats une fois les calculs terminés. Les intrants et les manipulations intermédiaires nécessaires pour simuler des écoulements avec TELEMAC sont schématisés à la Figure 4-1.

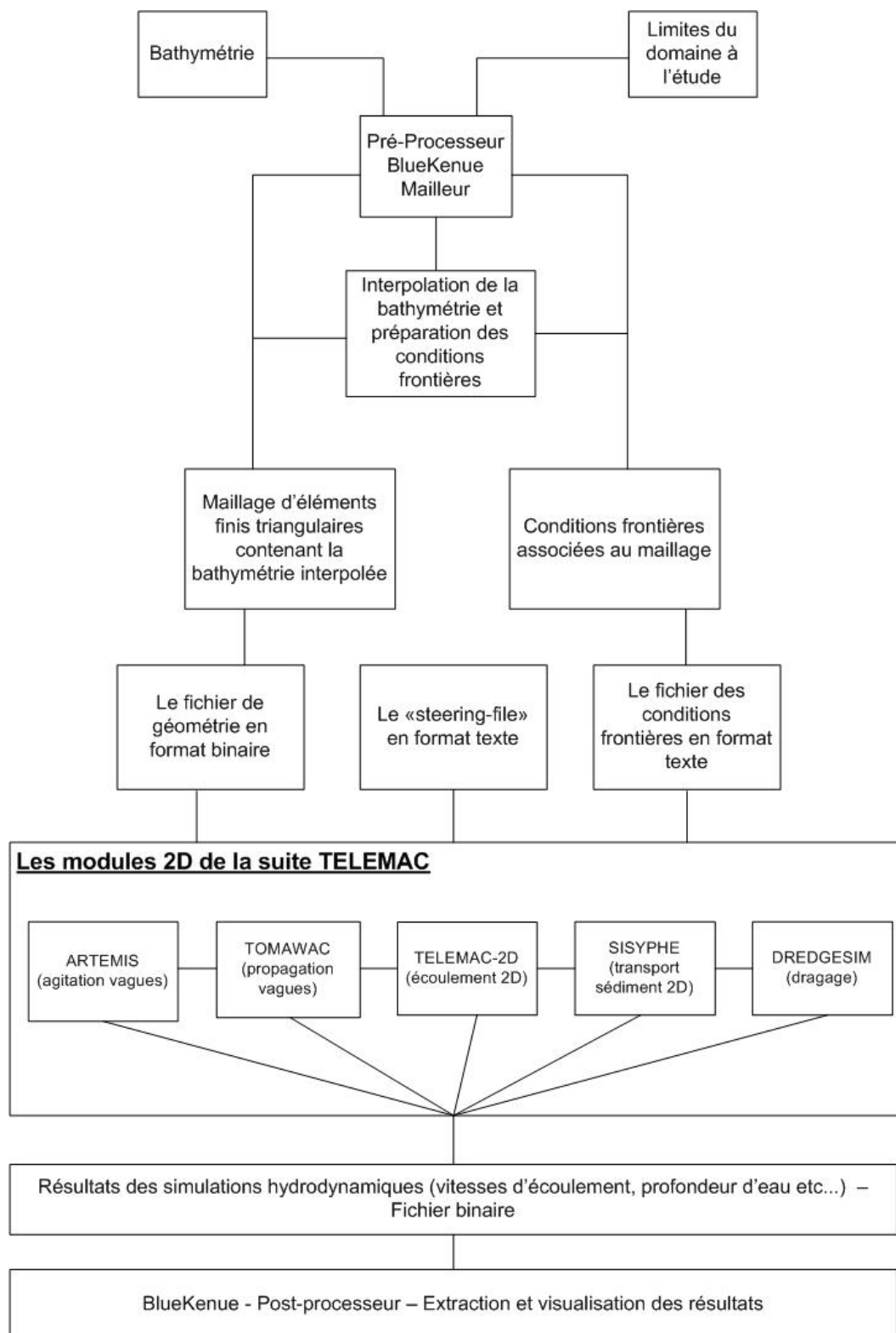


Figure 4-1 Intrants et étapes intermédiaires nécessaires pour simuler avec TELEMAC

Selon la Figure 4-1, les intrants pour générer un maillage avec BlueKenue sont les données bathymétriques et les limites du domaine d'étude. De plus, pour lancer une simulation avec TELEMAC, au minimum trois types de fichier sont nécessaires : le fichier de géométrie, le «steering file» et le fichier des conditions frontières. Le fichier de géométrie est en format binaire et est généré à partir de BlueKenue. Il est constitué du maillage du domaine à l'étude pour lequel la bathymétrie interpolée est attachée. Le fichier «steering file» est le fichier texte principal qui dicte les différentes caractéristiques et les différents paramètres de la simulation. Ce fichier doit être ajusté par l'utilisateur. Ensuite, le fichier des conditions frontières est un fichier texte qui est généré par BlueKenue. Il dicte à quels nœuds du maillage se trouvent les conditions frontières. Les conditions frontières décrivent l'écoulement de l'eau aux limites du domaine. Différentes possibilités sont offertes par TELEMAC-2D pour les conditions frontières : frontière sèche, frontière avec hauteur d'eau prescrite, frontière avec débit prescrit, frontière avec vitesse prescrite, etc.

Il existe différents modules dans la suite TELEMAC. Chaque module a une fonction précise et permet de modéliser un phénomène bien précis relié à la dynamique de fluides. TELEMAC-2D est le module qui est utilisé dans le cadre de ce projet. Il serait toutefois possible de le coupler avec d'autres modules pour étudier les écoulements influencés par la propagation des vagues et du transport de sédiments.

Ce logiciel a été sélectionné pour différentes raisons. Tout d'abord, le code source est gratuit et libre d'accès. En le reprogrammant, il est possible de tester différentes formulations du coefficient de traînée décrites au Tableau 2-2. De plus, ce logiciel peut être installé sur n'importe quel système d'exploitation (Windows, Linux, etc.). Il permet également le parallélisme de la simulation. Le parallélisme permet d'augmenter la rapidité de calcul de la simulation en subdivisant le domaine et le maillage en autant de sous-parties qu'il y a de cœurs dans le processeur de l'ordinateur. Cette caractéristique du logiciel TELEMAC 2D a largement été utilisée afin de réduire le temps simulation. Ensuite, selon les équations (4.5) et (4.6), les efforts de vent transmis à l'équation de mouvement sont représentés en fonction de la profondeur d'eau. Ceci donne la possibilité d'étudier l'effet du vent sur les plans d'eau selon des niveaux d'exploitation variables. Finalement, Hydro-Québec utilise ce logiciel pour effectuer différentes études hydrauliques. Les modèles de Gouin et d'Outardes 4 qui seront développés au cours de ce mémoire pourront donc être réutilisés pour d'autres usages.

### 4.3 Description des réservoirs à l'étude

Deux réservoirs d'Hydro-Québec ont été choisis dans le cadre de ce projet de recherche : Outardes 4 et Gouin. La localisation de ces réservoirs est présentée à la Figure 4-2.



Figure 4-2 Localisation générale des réservoirs Outardes 4 et Gouin

Ils ont été sélectionnés puisque Haché et al. (2003) ont étudié antérieurement les effets de vent sur ces réservoirs et parce qu'Hydro-Québec n'a pas développé de modèle hydrodynamique de ces réservoirs jusqu'à présent. Cette section présente l'emplacement, la description des réservoirs et l'instrumentation en place d'Outardes 4 et Gouin.

### **4.3.1 Outardes 4**

Le réservoir Outardes 4 prend sa source du lac Plétipi situé à quelques centaines de kilomètres au nord du réservoir. Il alimente les trois centrales hydroélectriques situées sur la rivière aux Outardes : Outardes 4, Outardes 3 et Outardes 2. Le réservoir Outardes 4 est considéré comme le réservoir de tête de la rivière aux Outardes puisqu'il n'est pas alimenté par un débit régulé provenant d'un autre ouvrage à l'amont. Trois limnimètres et une station de mesure de vent sont installés sur ce réservoir. Leur emplacement est indiqué à la Figure 4-3.

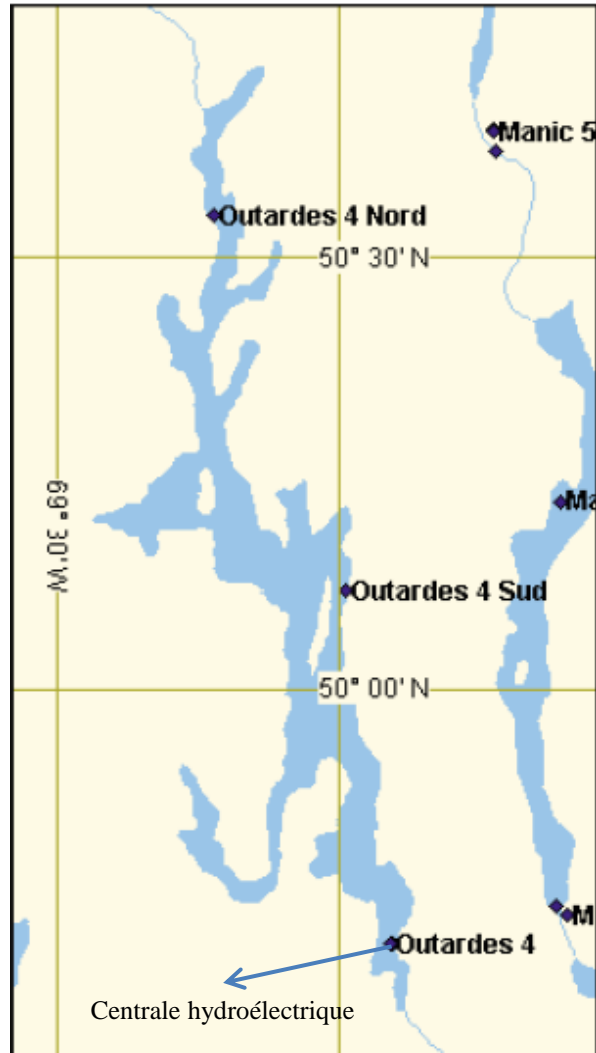


Figure 4-3 Localisation du réservoir Outardes 4  
– Adapté de Haché et al. (2003)

Tableau 4-1 Localisation des limnimètres et de la station de mesure de vent (anémomètre et girouette) - Adapté de

Haché et al. (2003)

Réservoir	Limnimètre	Longitude	Latitude
Outardes-4	Outardes-4 Nord	66°13'30"	50°32'50"
	Outardes-4 Sud <sup>a</sup>	68°59'20"	50°06'48"
	Centrale Outardes-4 <sup>b</sup>	68°54'28"	49°42'25"

<sup>a</sup>Station météorologique.

<sup>b</sup>Limnimètre près d'une centrale ou d'un évacuateur.

Tableau 4-2 Caractéristiques générales du réservoir Outardes 4 –

Adapté de Haché et al. (2003)

Caractéristique	Outardes-4
Système hydrique	des-Outardes
Superficie du bassin versant (BV) (km <sup>2</sup> )	17 063
Superficie du réservoir (R) (km <sup>2</sup> )	
Maximum (km <sup>2</sup> )	625
Minimum (km <sup>2</sup> )	493
Rapport des superficies (R/BV)	
Minimum (%)	4
Maximum (%)	3
Nombre de limnimètres	3

### 4.3.2 Gouin

L'aménagement Gouin est le réservoir de tête du complexe hydroélectrique de la rivière Saint-Maurice et se situe à environ 110 km au sud de la ville et du lac Chibougamau. Avec un plan d'eau de plus de 1700 km<sup>2</sup>, le réservoir Gouin a pour objectif de régulariser les débits et d'augmenter le potentiel énergétique de la rivière Saint-Maurice. Même s'il n'est pas rattaché au réseau électrique, Gouin compte une mini-centrale installée près de la rive droite qui permet le fonctionnement des vannes de l'évacuateur. Deux limnimètres et une station de mesure de vent sont installés sur le réservoir. Leur emplacement est indiqué à la Figure 4-4.

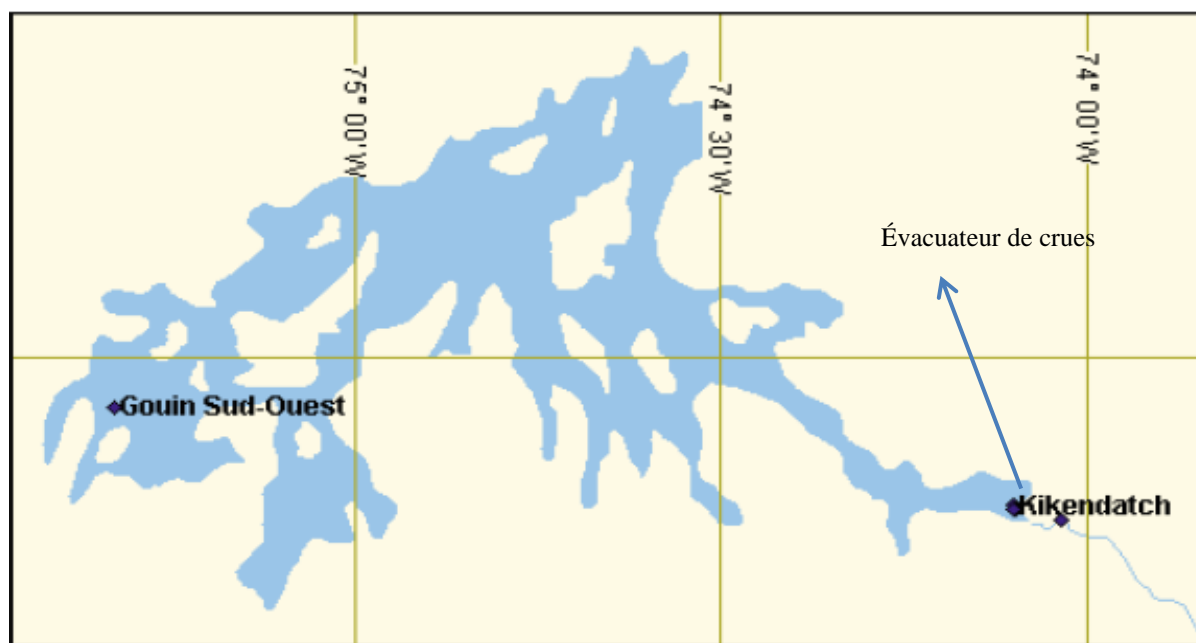


Figure 4-4 Localisation du réservoir Gouin – Adapté de Haché et al. (2003)

Tableau 4-3 Localisation des limnimètres et de la station de mesure de vent (anémomètre et girouette) - Adapté de Haché et al. (2003)

Réservoir	Limnimètre	Longitude	Latitude
Gouin	Gouin Sud-Ouest <sup>a</sup>	75°19'48"	48°27'04"
	Baie de Kikendatch <sup>b</sup>	74°06'10"	48°21'09"

<sup>a</sup>Station météorologique.

<sup>b</sup>Limnimètre près d'une centrale ou d'un évacuateur.

Tableau 4-4 Caractéristiques du réservoir Gouin – Adapté de Haché et al. (2003)

Caractéristique	Réservoir Gouin
Système hydrique	St-Maurice
Superficie du bassin versant (BV) (km <sup>2</sup> )	9376
Superficie du réservoir (R) (km <sup>2</sup> )	
Maximum (km <sup>2</sup> )	1789
Minimum (km <sup>2</sup> )	1380
Rapport des superficies (R/BV)	
Minimum (%)	19
Maximum (%)	15
Nombre de linnimètres	2

## 4.4 Données disponibles

Cette section présente les données disponibles qui seront utilisées tout au long de ce mémoire.

### 4.4.1 Données hydrométriques

Les données hydrométriques correspondent aux niveaux d'eau, au débit turbiné, au débit déversé et au débit d'apport. Le Tableau 4-5 présente la disponibilité des différentes données hydrométriques. On peut observer dans ce tableau que les données utilisées par Haché et al. (2003) pour établir les régressions non paramétriques de l'effet du vent sur Outardes 4 et Gouin (voir Figure 2-8) sont disponibles. Toutefois, pour le réservoir Outardes 4, ces données semblaient contenir des valeurs aberrantes. Puisqu'aucun détail n'était disponible sur la façon dont Haché et al. (2003) ont traité ces valeurs aberrantes, les séries de niveaux comprises entre les années 1997 et 1998 n'ont pas été prises en compte dans la méthodologie de ce rapport. On peut également remarquer à ce tableau que la série de données SPAN (Système de Prévision d'Apport Naturel) est disponible entre les années 2005 et 2012. Cette base de données contient les valeurs d'apport naturel officielles utilisées à Hydro-Québec. Ces valeurs sont obtenues à partir du signal d'apport calculé par l'équation (2.3), du modèle hydrologique HSAMI (voir section 1.1) et du jugement d'un hydrologue expérimenté à Hydro-Québec. Ensuite, on peut remarquer que les intrants nécessaires pour le calcul de bilan hydrique (équation (2.3) ne sont disponibles que pour les années comprises entre 2005 et 2012. Ces données proviennent d'une

base de données d'Hydro-Québec intitulée *SSEP*. Finalement, la Figure 4-5 et la Figure 4-6 présentent les séries d'apports naturels calculés par l'équation (2.3) pour les réservoirs Outardes 4 et Gouin. On peut facilement remarquer à ces figures que le calcul d'apport par bilan hydrique à Gouin comporte beaucoup plus de bruit et de fluctuations improbables qu'à Outardes 4. Le faible nombre de limnimètres installés et les impacts de vent/manœuvres ayant un effet significatif sur le calcul du niveau combiné sont les causes premières du signal d'apport bruité à Gouin.

Tableau 4-5 Disponibilité des données hydrométriques pour les réservoirs Outardes 4 et Gouin

Données hydrométriques				
Réservoir	Type	Instrument	Intervalle des mesures	Disponibilité des mesures
Outardes 4	Niveau (m)	Limnimètre amont	15 min	<u>1997/01/01 à 1998/12/31 *</u>
	Niveau (m)	Limnimètre sud	15 min	<u>1997/01/01 à 1998/12/31 *</u>
	Niveau (m)	Limnimètre nord	15 min	<u>1997/01/01 à 1998/12/31 *</u>
	Niveau (m)	Limnimètre centrale	5 min	2005/04/14 à 2012/07/05
	Niveau (m)	Limnimètre sud	15 min	2005/04/14 à 2012/07/05
	Niveau (m)	Limnimètre nord	15 min	2005/04/14 à 2012/07/05
	Niveau combiné (m)	Calculé voir équation (2.5)	5 min	2005/04/14 à 2012/07/05
	Débit turbiné (m³/s)	Calculé voir Figure (2.2)	5 min	2005/04/14 à 2012/07/05
	Apport naturel calculé (m³/s)	Calculé voir équation (2.3)	Journalier	2005/04/14 à 2012/07/05
	Apport naturel filtré (m³/s)	SPAN **	Journalier	2005/01/01 à 2012/12/31
Gouin	Niveau (m)	Limnimètre amont	15 min	1997/01/01 à 1998/12/31 *
	Niveau (m)	Limnimètre sud-ouest	15 min	1997/01/01 à 1998/12/31 *
	Niveau (m)	Limnimètre amont	5 min	2005/04/14 à 2012/07/05
	Niveau (m)	Limnimètre sud-ouest	15 min	2005/04/14 à 2012/07/05
	Niveau combiné (m)	Calculé voir équation (2.5)	5 min	2005/04/14 à 2012/07/05
	Débit déversé (m³/s)	Calculé voir Figure (2.2)	Horaire	2005/04/14 à 2012/07/05
	Apport naturel calculé (m³/s)	Calculé voir équation (2.3)	Journalier	2005/04/14 à 2012/07/05
	Apport naturel filtré (m³/s)	SPAN **	Journalier	2005/01/01 à 2012/12/31

**Légende**

\* Données utilisées par Haché et al. (2003)

Données rejetées, valeurs aberrantes

\*\* Série de données d'apport naturel officielles à Hydro-Québec

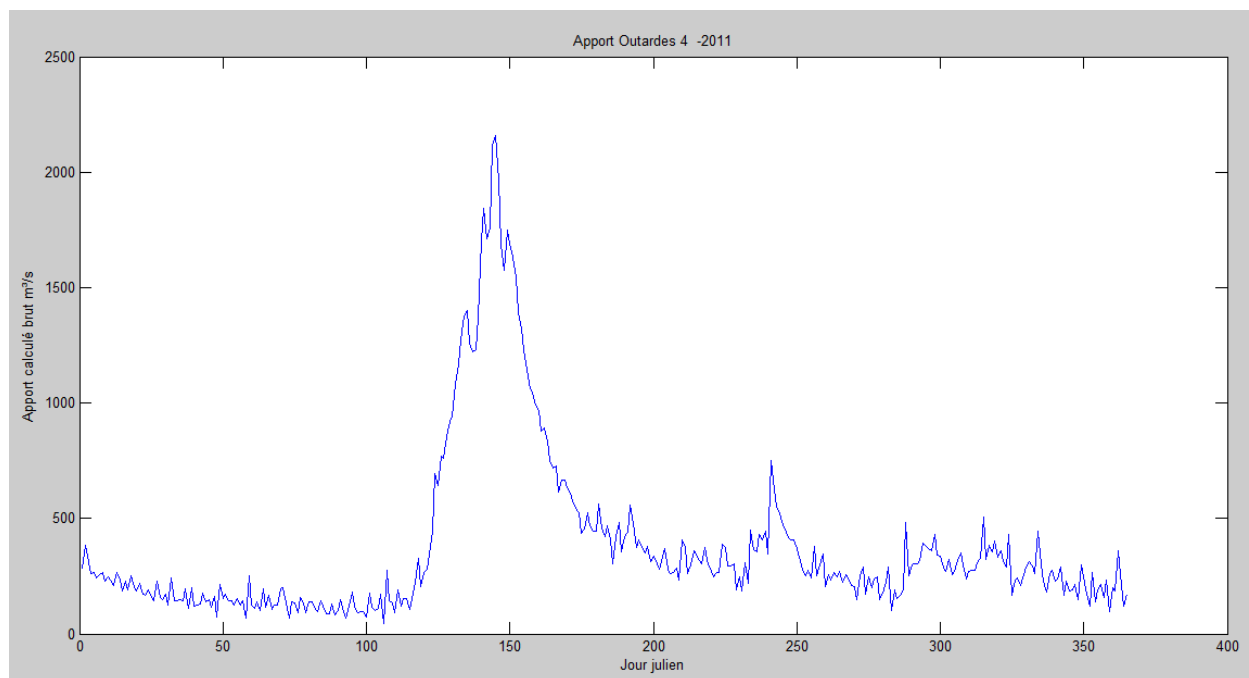


Figure 4-5 Apport naturel calculé par bilan hydrique (équation 2.3) pour le réservoir Outardes 4 en 2011

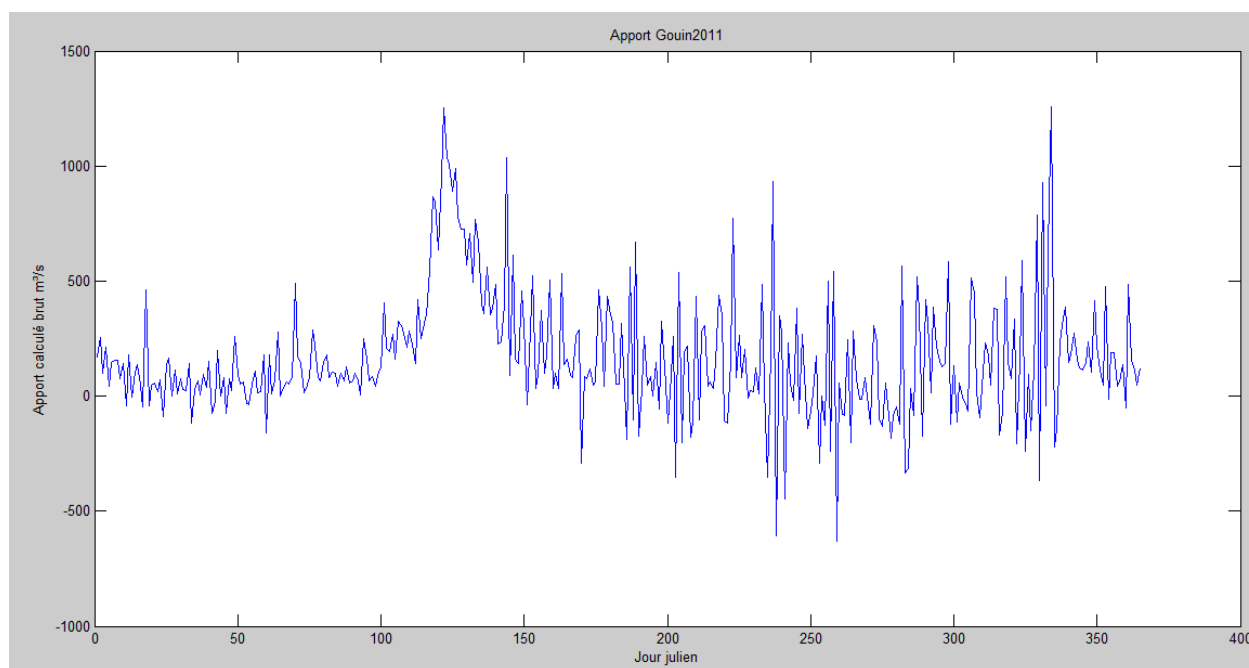


Figure 4-6 Apport naturel calculé par bilan hydrique (équation 2.3) pour le réservoir Gouin en 2011

### 4.4.2 Données météorologiques

Les données météorologiques considérées dans ce rapport sont constituées des mesures de vitesse et de direction de vent. Les vitesses du vent ont été mesurées par un anémomètre installé à 10 m du sol et les directions du vent ont été mesurées par une girouette installée à la même hauteur. Il a été déterminé par Haché et al. (2003) que la vitesse du vent explique l'amplitude de la dénivellation due au vent et que la direction détermine l'orientation des dénivellations du plan d'eau et des zones nodales (zone où les dénivellations dues au vent sont nulles). Lorsqu'il est question d'étudier les différences de niveaux entre deux limnimètres, dépendamment de leur position, la différence de niveau entre les instruments sera maximale lorsque la direction du vent est parallèle à l'axe reliant les deux jauges  $\theta_{AB}$  et elle sera minimale lorsqu'elle est perpendiculaire à cet axe (Haché et al., 2003). Ces directions théoriques du vent pour lesquelles les différences de niveaux sont maximales et minimales sont présentées au Tableau 4-6. La disponibilité des données de vent est présentée au Tableau 4-7. Les données de vitesse et de direction pour Outardes 4 et Gouin sont schématisées selon un format de rose des vents à la Figure 4-7 et à la Figure 4-8

Tableau 4-6 Axe reliant deux jauges limnimétriques  $\theta_{AB}$  et directions théoriques du vent pour lesquelles les différences de niveaux sont maximales et minimales – Tiré de Haché et al. (2003)

Réservoir et limnimètre	$\theta_{AB}$	Effet nul		Effet maximum	
Gouin					
Gouin Sud-Ouest et Baie Kikendatch	96°	6°	186°	96°	276°
Outardes-4					
Outardes-4 Sud et Centrale Outardes-4	171°	81°	261°	171°	351°
Outardes-4 Sud et Outardes-4 Nord	161°	71°	251°	161°	341°
Outardes-4 Nord et Centrale Outardes-4	164°	74°	254°	164°	344°

Tableau 4-7 Disponibilité des données météorologiques pour les réservoirs Outardes 4 et Gouin

Données météorologiques				
Réservoir	Type	Instrument	Intervalle des mesures	Disponibilité des mesures
Outardes 4	Vitesse (km/h)	Anémomètre	15 min	1997/01/01 à 1998/12/31 *
	Vitesse (km/h)	Anémomètre	15 min	2005/04/14 à 2012/07/05
	Direction (°)	Girouette	15 min	1997/01/01 à 1998/12/31 *
	Direction (°)	Girouette	15 min	2005/04/14 à 2012/07/05
Gouin	Vitesse (km/h)	Anémomètre	15 min	1997/01/01 à 1998/12/31 *
	Vitesse (km/h)	Anémomètre	horaire	2005/12/06 à 2012/12/19
	Direction (°)	Girouette	15 min	1997/01/01 à 1998/12/31 *
	Direction (°)	Girouette	horaire	2005/12/06 à 2012/12/19

**Légende**

\* Données utilisées par Haché et al. (2003)

On peut observer à la Figure 4-7 et à la Figure 4-8 qu'il y a plusieurs épisodes de vent d'une vitesse supérieure à 20 km/h qui affectent l'axe reliant les instruments de mesure autant pour le réservoir Gouin que le réservoir Outardes 4. Lorsque le vent souffle dans la direction de  $\theta_{AB}$ , des différences de niveaux entre les instruments ont plus de chance de se produire. Conséquemment, selon Haché et al. (2003), il y a plus de chance qu'une erreur due au vent soit introduite dans le calcul d'apport par bilan hydrique.

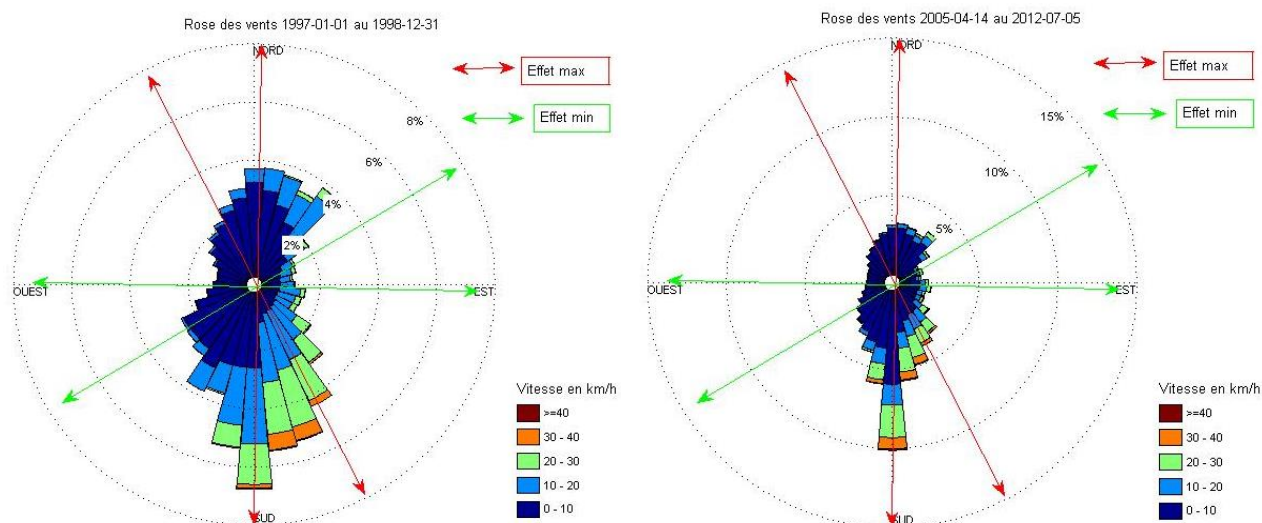


Figure 4-7 Rose des vents et fréquences relatives des vitesses et direction pour le réservoir Outardes 4, zone effet max = 151° à 181° et zone effet min : 61° à 91° selon les différences de niveaux entre les trois limnimètres

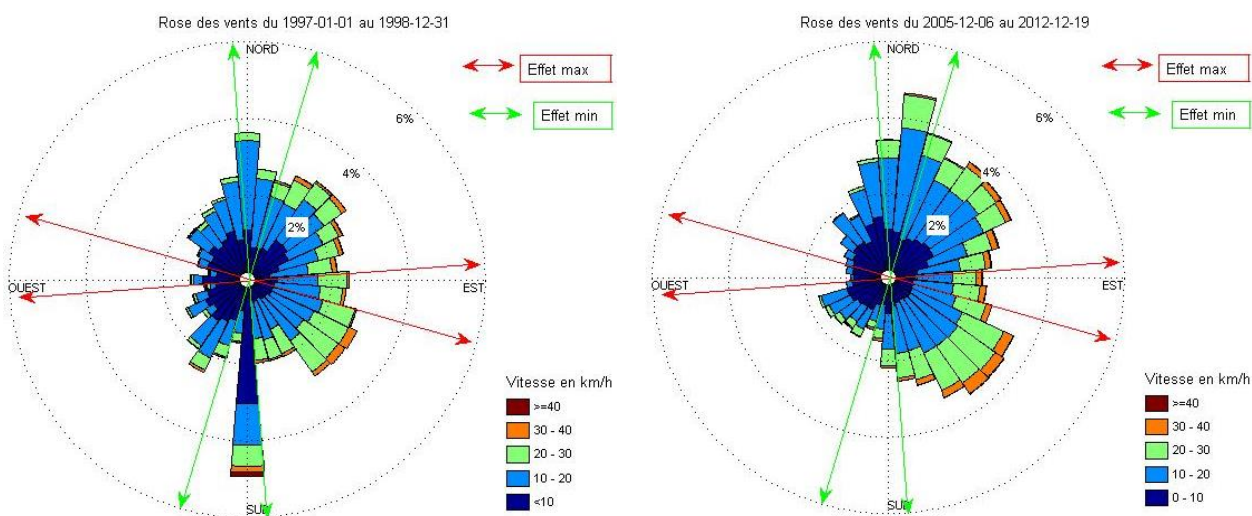


Figure 4-8 Rose des vents et fréquences relatives des vitesses et direction pour le réservoir Gouin, zone effet max = 86° à 106° et zone effet min : 356° à 16° selon les différences de niveaux entre les deux limnimètres

Toutefois, il ne faut pas oublier que l'effet du vent influence individuellement chaque instrument de mesure et qu'une erreur introduite dans le bilan hydrique ne peut être représentée exclusivement que par les différences de niveau entre les instruments : un vent d'une certaine direction pourrait par exemple faire varier deux limnimètres dans le même sens. À ce moment, la différence de niveau serait nulle, mais une erreur serait quand même introduite dans le bilan hydrique à cause de la variation unidirectionnelle des jauges limnimétriques.

#### **4.4.3 Données bathymétriques**

Les données bathymétriques sont nécessaires pour effectuer la modélisation hydrodynamique des réservoirs Gouin et Outardes 4.

Les données bathymétriques à Outardes 4 consistent en une série de 5 cartes topographiques qui ont été élaborées par la technique de la photogrammétrie avant le remplissage du réservoir (1969). La photogrammétrie est une technique qui permet de juxtaposer deux images aériennes pour déduire la topographie d'un secteur. Ces cartes numérisées et géo-référencées ont été fournies par le département de géomatique d'Hydro-Québec (voir Figure 4-9). Un relevé bathymétrique près du canal d'amené (voir Figure 4-10) a également été effectué en 1992 et a également été utilisé dans l'élaboration du modèle.



Figure 4-9 Les 5 cartes topographiques avant remplissage du réservoir Outardes 4

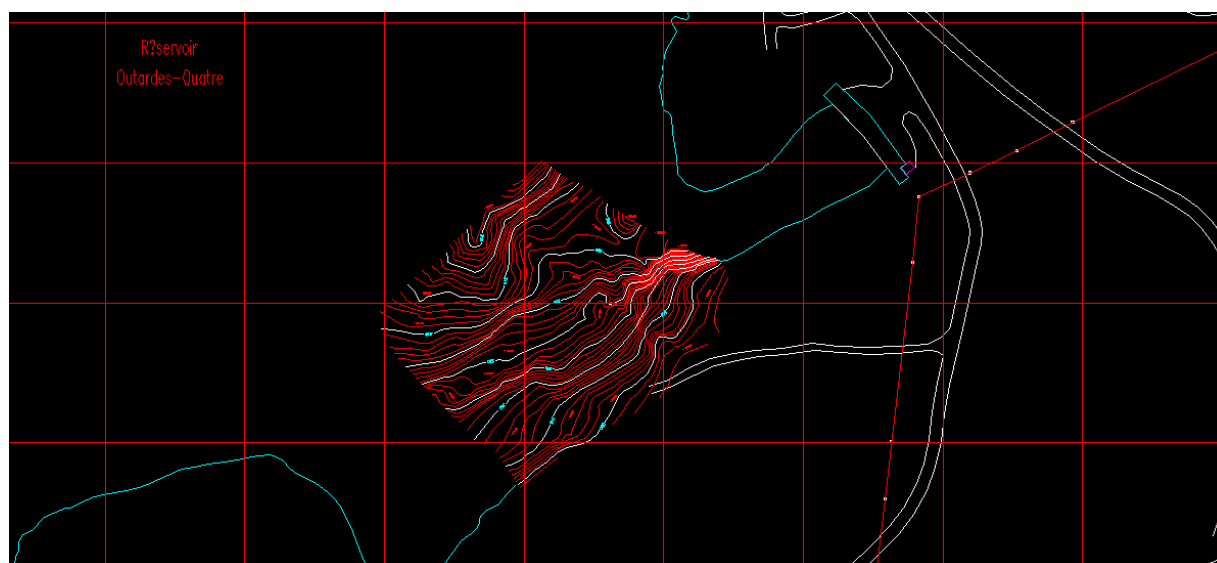


Figure 4-10 Relevé bathymétrique près de la zone du canal d'amené à Outardes 4

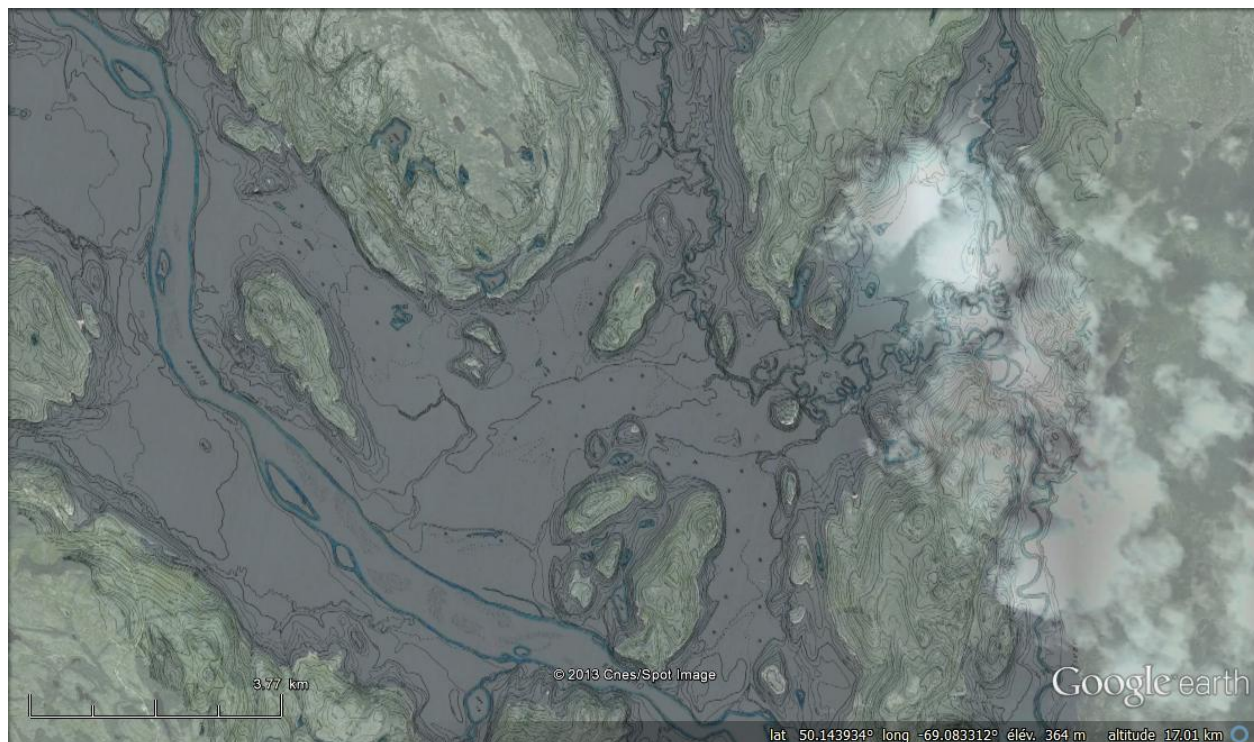


Figure 4-11 Exemple d'une des cartes topographiques avant remplissage juxtaposée avec la topographie actuelle du site du réservoir Outardes 4

Les données bathymétriques à Gouin consistent en une série de quatre cartes de relevés bathymétriques publiées en 2001 par la compagnie « TRAK ». Cette carte indique la profondeur d'eau du réservoir sous forme de courbes de contour et de points de mesure à différents endroits sur ce grand lac artificiel (voir Figure 4-12)

La profondeur d'eau est indiquée en prenant en considération que le niveau d'exploitation moyen du réservoir est de 403.5 m. Un point négatif de ces cartes est que les métadonnées sont inexistantes (date des relevés bathymétriques, type d'instrument utilisé, type d'embarcation utilisée, etc...).

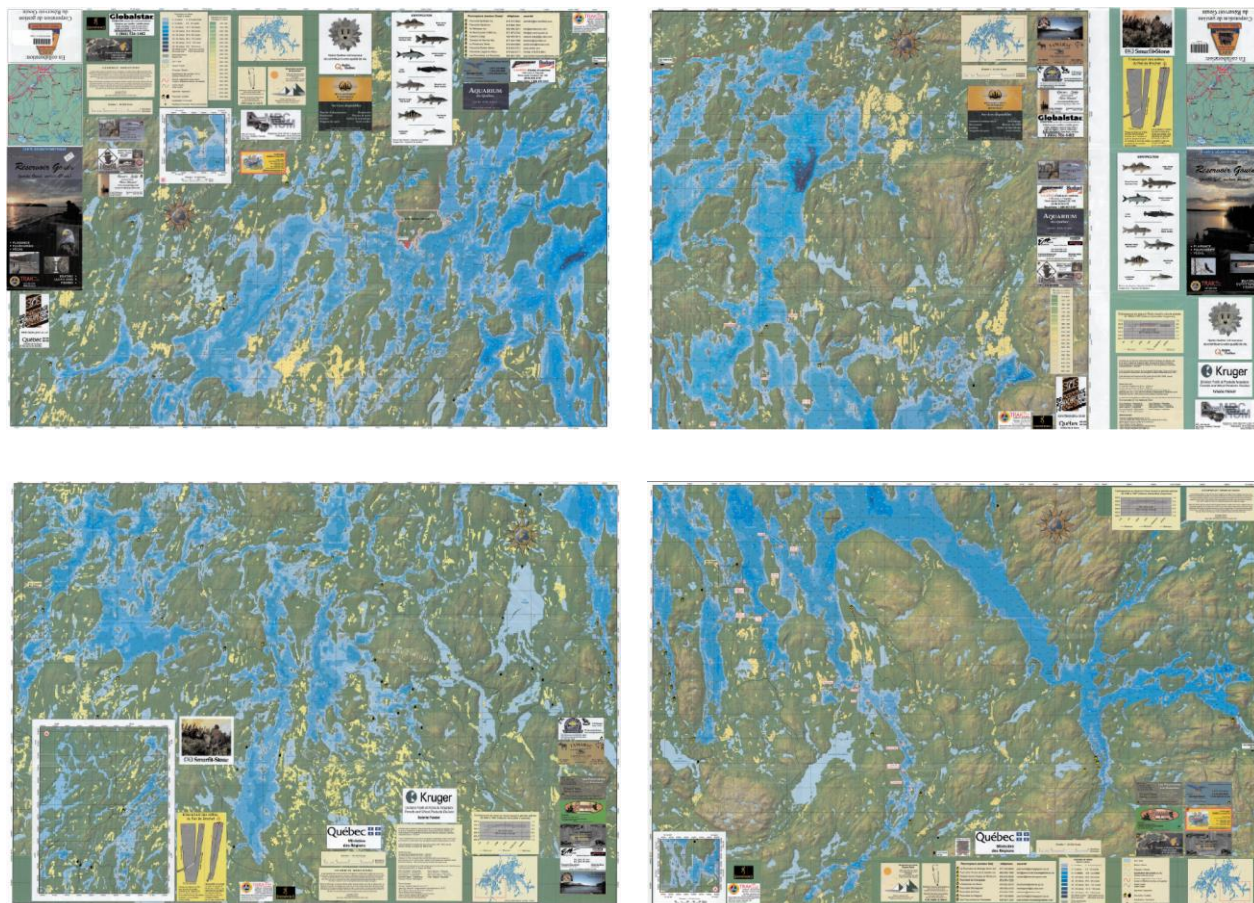


Figure 4-12 Cartes bathymétriques du réservoir Gouin publiées par la compagnie « TRAK »

## 4.5 Préparation des données bathymétriques

Les données bathymétriques présentées à la section 4.4.3 sont en format image. Afin de les utiliser pour effectuer des simulations hydrodynamiques, il faut tout d'abord les convertir en format vectoriel. Cette conversion s'effectue à l'aide d'un logiciel de dessin vectoriel (ex ; AutoCAD) et consiste à retracer chaque courbe de contour de niveau pour leur attribuer leur élévation respective. Pour Outardes 4, comme on peut le voir sur la Figure 4-13 (a), les cartes topographiques avant remplissage ne couvrent pas entièrement le réservoir. Aux endroits non couverts par les cartes topographiques, la bathymétrie a été extrapolée manuellement afin d'ajuster la courbe d'emménagement du modèle à la courbe officielle d'Hydro-Québec (voir Figure 4-13 (a)). Pour le réservoir Gouin, les courbes de contour et les points de mesure ont été

vectorisés selon l'élévation de référence de 403.5 m (voir Figure 4-14 a). La bathymétrie de ce réservoir est extrêmement complexe (bancs découvrant, îles parsemées et restrictions d'écoulement). En dessous d'une cote se situant entre 401 et 402 m, le réservoir se divise en deux lacs distincts. À cette élévation, les deux limnimètres ne mesurent pas les variations de niveau sur le même plan d'eau.

Une fois la vectorisation des cartes terminée, il faut ensuite interpoler les bathymétries vectorisées. Cette étape est effectuée à partir du logiciel BlueKenue (voir Figure 4-13 b et Figure 4-14 b). La bathymétrie vectorisée et interpolée peut ensuite être enregistrée dans un fichier de géométrie compatible avec TELEMAC-2D.

Finalement, afin de vérifier la préparation des données bathymétriques, il est possible de comparer les courbes d'emmagasinement vectorisées avec les courbes d'emmagasinement officielles d'Hydro-Québec (voir Figure 4-13 (c) et Figure 4-14 (c)). Les courbes d'emmagasinement vectorisées ont été obtenues à l'aide d'une fonction remblai/déblai d'un logiciel SIG. Pour les deux réservoirs, les courbes d'emmagasinement vectorisées se comparent raisonnablement aux courbes officielles.

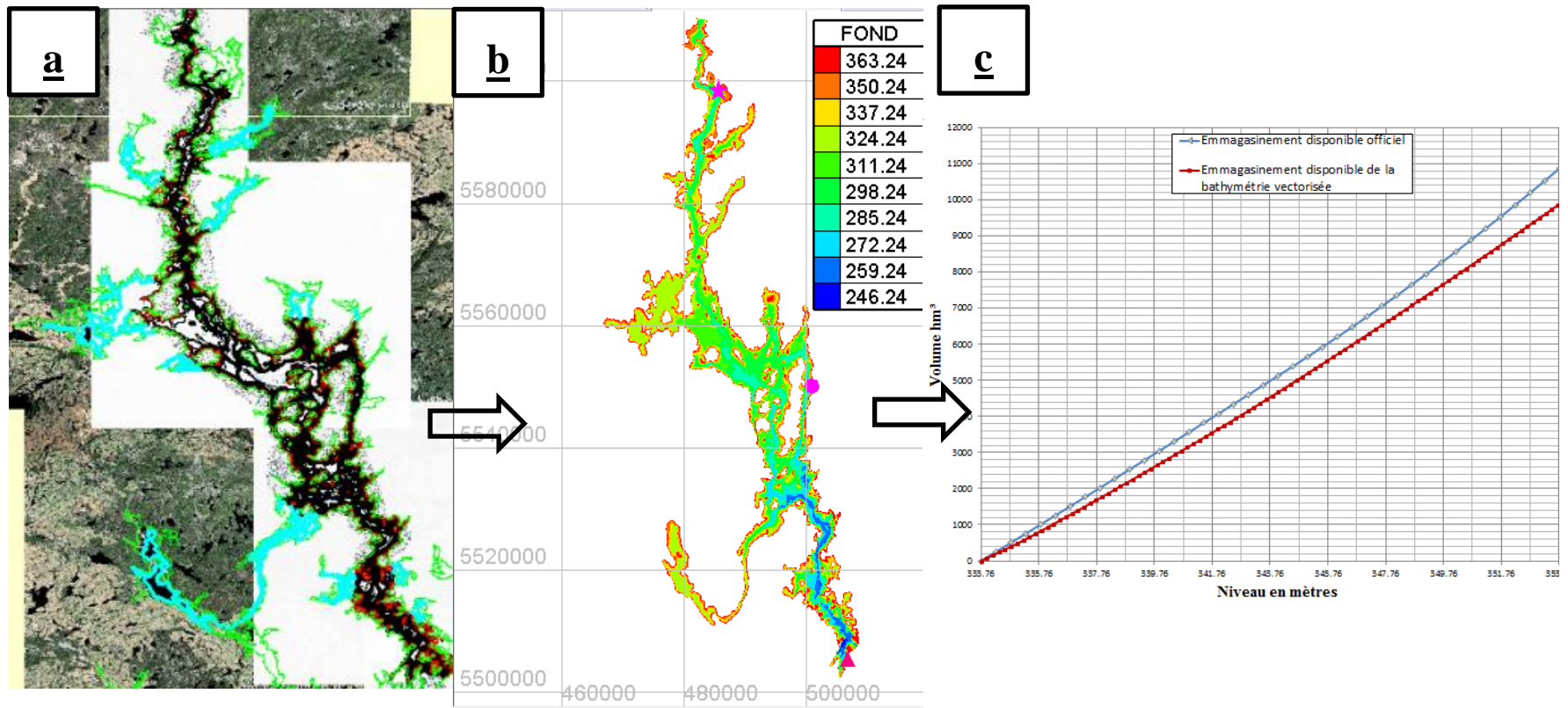


Figure 4-13 Préparation des données bathymétriques d'Outardes 4 – (a) Vectorisation, (b) Interpolation de la bathymétrie, (c) Courbe d'emmagasinement vectorisée VS officielle

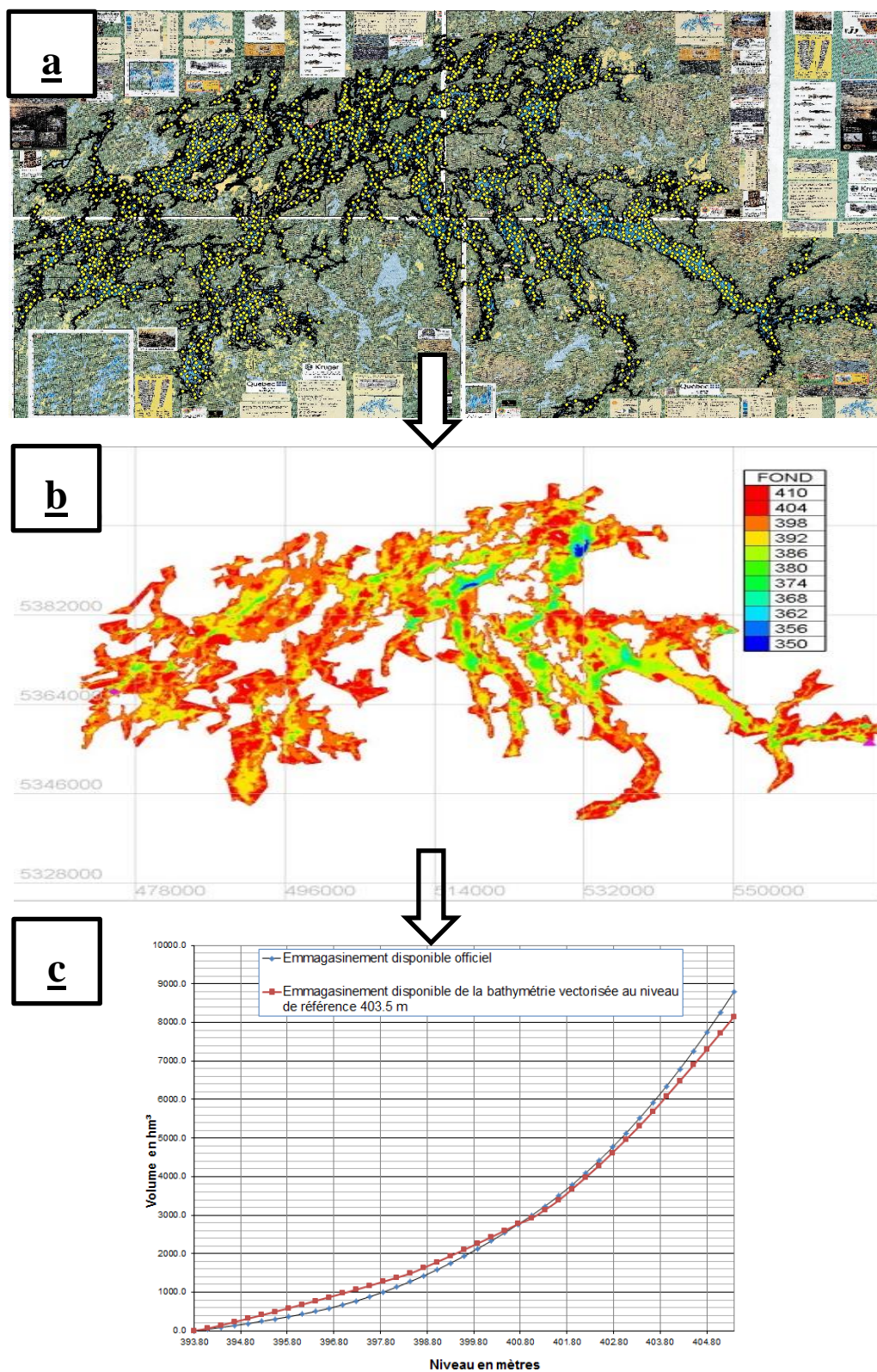


Figure 4-14 Préparation des données bathymétriques de Gouin – (a) Vectorisation, (b) Interpolation de la bathymétrie, (c) Courbe d’emmagasinement vectorisée VS officielle

## 4.6 Génération des maillages

### 4.6.1 Considérations générales

Avant d'utiliser TELEMAC 2D, il est nécessaire de discrétiser spatialement le réservoir à l'étude. Cette étape peut être réalisée en générant un maillage. Dans TELEMAC 2D, un maillage est constitué de nœuds de calculs et d'éléments triangulaires. Chaque élément triangulaire est composé de trois nœuds de calculs. Les résultats obtenus par la résolution des équations descriptives de la dynamique des fluides sont calculés à chaque nœud du maillage puis interpolés à l'intérieur de chaque élément triangulaire. Le maillage est également borné par les conditions frontières du modèle. Ces conditions aux limites peuvent être soit sèches ou liquide (entrées et/ou sorties d'eau du modèle). Selon le manuel d'utilisateurs de TELEMAC 2D (EDF, 2010), certaines précautions doivent être prises lors de la génération du maillage :

1. Une condition frontière liquide doit au minimum être définie par cinq nœuds de calcul. Il est toutefois recommandé qu'elle en possède dix.
2. En période d'étiage, un minimum de 3 à 4 nœuds de calcul est nécessaire pour assurer un transport de débit adéquat. Si cette condition n'est pas respectée, le modèle aura de la difficulté à assurer la conservation de la masse et les résultats pourraient être de mauvaise qualité.
3. Aux endroits de forts gradients bathymétriques, il est recommandé de densifier le maillage si les courants ne sont pas tangents à la pente de la bathymétrie.
4. Il est préférable d'assurer des éléments triangulaires le plus équilatéraux possibles. Toutefois, dans le cas des maillages de rivière, il est préférable d'utiliser des éléments de forme allongée dans le sens du courant.
5. Il faut toujours s'assurer que les nœuds de calcul situés sur une condition frontière liquide soient noyés pour toute la durée de la simulation.

### 4.6.2 Génération des maillages avec BlueKenue

BlueKenue est logiciel de pré/post traitement utilisé en complément avec TELEMAC 2D. Ce logiciel permet de générer des maillages et d'observer les résultats calculés par TELEMAC 2D. La première étape pour générer un maillage est de tracer un polygone qui délimite la zone à

l'étude. Cette ligne doit ensuite être rééchantillonnée afin qu'elle soit définie par des nœuds de calcul à un intervalle de distance régulier. Plus cet intervalle de distance sera court, plus le maillage sera dense près de la limite de la zone d'étude. Lorsque le rééchantillonnage du polygone est complété, celui-ci peut être utilisé comme « Outline » dans le mailleur de BlueKenue.

Ensuite, il est nécessaire de décider si les îles situées dans le domaine à l'étude seront noyées ou non durant la simulation. Si certaines îles sont assurément dénoyées pour toutes les simulations à effectuer, il est possible de les exclure du maillage en traçant des polygones fermés et rééchantillonnés de la même forme que chaque île et d'inclure ces polygones dans la section « Hardline » du mailleur de BlueKenue.

Finalement, afin de décider de la densité générale du maillage, il est nécessaire de choisir une longueur maximale d'un côté d'élément en faisant varier l'option « Edge length » du mailleur de BlueKenue. Des raffinages locaux peuvent être appliqués en traçant un polygone dans la zone à raffiner. Pour ce faire, il est nécessaire d'attribuer une longueur maximale du côté d'élément souhaitée comme élévation du polygone. Ce polygone peut ensuite être utilisé dans la section « Density » du mailleur de BlueKenue.

Trois maillages pour Outardes 4 et trois autres pour Gouin ont été générés à l'aide de BlueKenue. Les caractéristiques de ces maillages sont présentées au Tableau 4-8.

Tableau 4-8 Caractéristiques des maillages pour Outardes 4 et Gouin

Caractéristiques des maillages	Réservoir					
	Outardes 4			Gouin		
	#1	#2	#3	#1	#2	#3
Nombre arrondis de noeuds	39000	142000	300000	147000	223000	394000
Élévation correspond à la limite de la zone d'étude (m)	369	369	369	410	410	410
Distance entre les noeuds du "Outline" (m)	120	75	50	75	100	50
Longueur maximale des côtés d'éléments "Edge length" (m)	625	75	50	150	100	75

Les maillages #2 des réservoirs Gouin et Outardes 4 sont présentés à la Figure 4-15 et à la Figure 4-16.

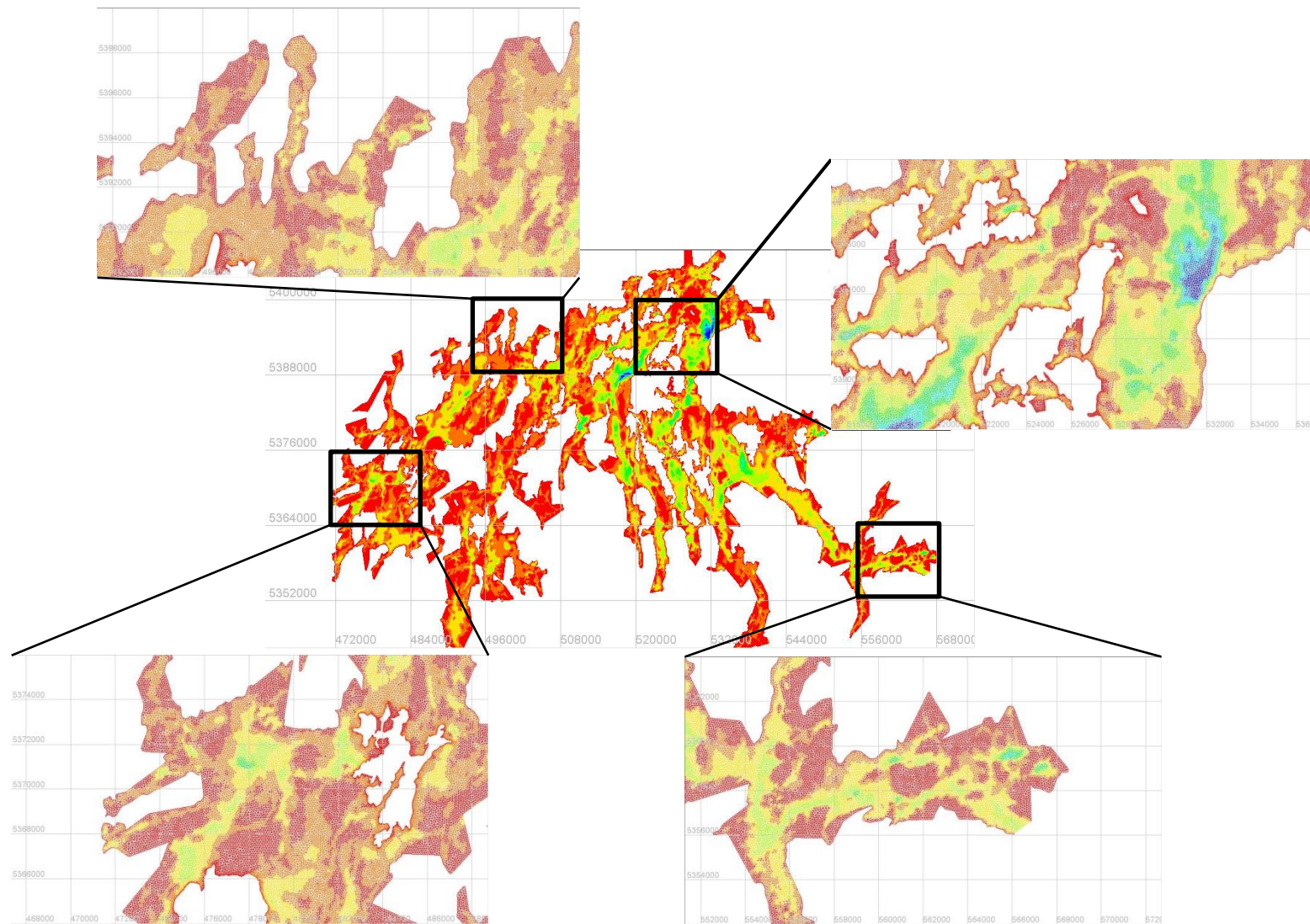


Figure 4-15 Maillage de Gouin à 223000 nœuds - Système de coordonnées UTM zone 18 avec un datum NAD83

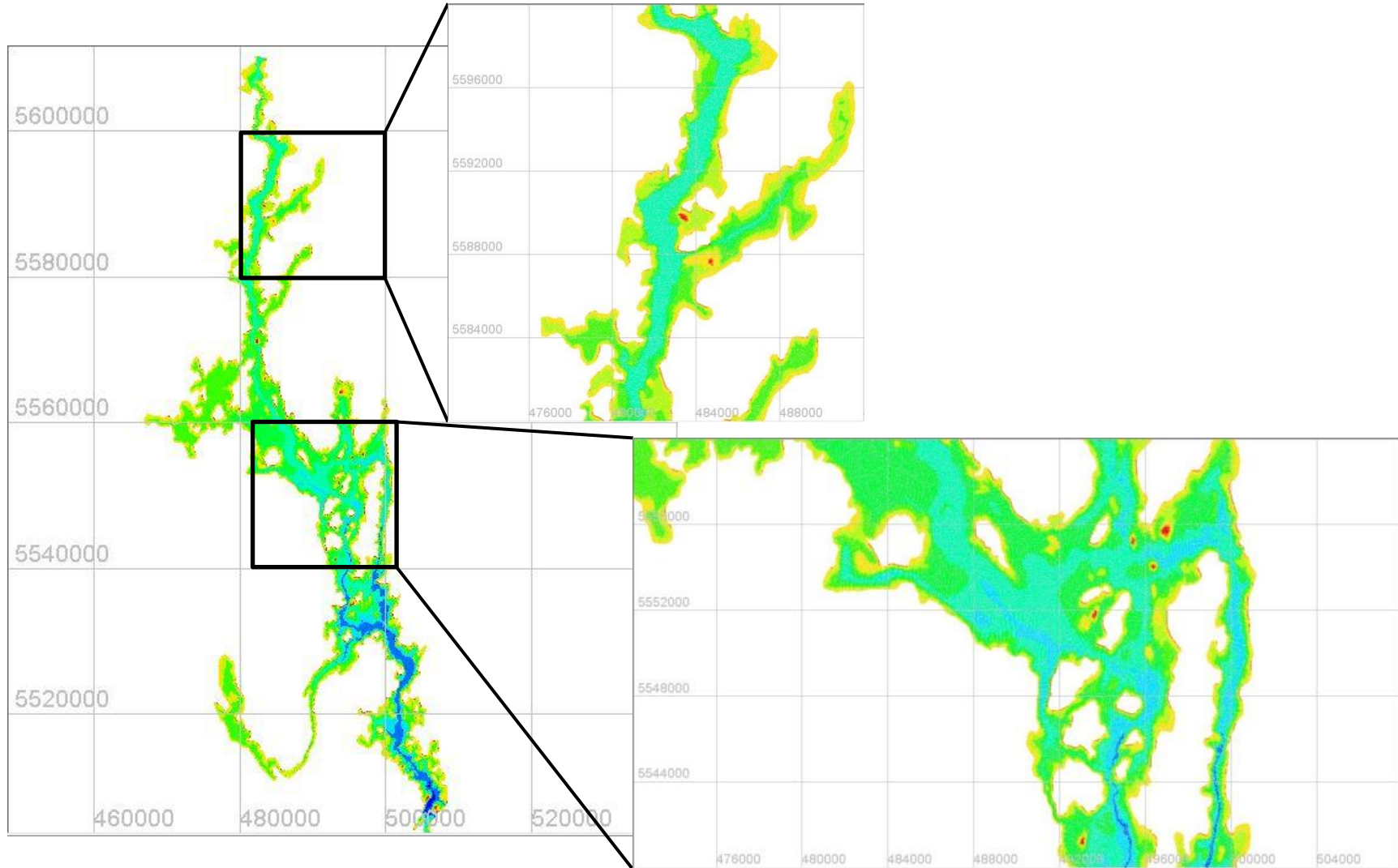


Figure 4-16 Maillage d'Outardes 4 à 142000 nœuds – Système de coordonnées UTM zone 19 avec un datum NAD83

## 4.7 Conclusions et recommandations

Ce chapitre avait pour objectif de présenter les études de cas qui seront effectués sur les réservoirs Outardes 4 et Gouin. À cette fin, l'outil de calcul TELEMAC 2D a été décrit. Ensuite, les réservoirs hydroélectriques choisis et leurs données respectives ont été présentés. L'analyse des données disponibles et des équations résolues par TELEMAC-2D permet d'établir les conclusions/recommandations suivantes :

- La formulation des efforts de vent dans TELEMAC-2D est fonction de la profondeur d'eau. Lors de simulations en écoulement permanent qui seront effectuées au chapitre 5, il sera possible d'étudier l'effet du vent selon différents niveaux d'exploitation.
- En observant les séries historiques d'apports naturels calculés par bilan hydrique, il est possible de constater que les apports naturels à Outardes 4 sont beaucoup moins bruités que ceux au réservoir Gouin.
- En observant les roses des vents des réservoirs Outardes 4 et Gouin, il est possible de constater la présence de plusieurs épisodes de forts vents orientés dans l'axe reliant les limnimètres.
- Les bathymétries interpolées qui ont été utilisées dans les modèles hydrodynamiques ont été validées en comparant les courbes d'emmagasinement générées à partir des données bathymétriques vectorisées avec les courbes d'emmagasinement officielles d'Hydro-Québec. L'écart entre les nouvelles courbes d'emmagasinement et les courbes officielles est faible. Toutefois, la nouvelle courbe d'emmagasinement d'Outardes 4 présente un écart modéré au fur et à mesure que le niveau du réservoir augmente. Cet écart peut être expliqué par le fait que les données bathymétriques ont dû être extrapolées pour couvrir tout le réservoir.
- La bathymétrie du réservoir Gouin est extrêmement complexe. En fait, le réservoir se divise en deux lacs distincts lorsque le niveau d'eau atteint une cote entre 401 et 402 m. À ce moment, les deux limnimètres n'enregistrent plus les variations de niveaux sur le même plan d'eau.

## CHAPITRE 5 MODÉLISATION HYDRODYNAMIQUE DE L'EFFET DU VENT EN ÉCOULEMENT NON PERMANENT

### 5.1 Introduction

Il est rare d'observer un épisode de vent uniforme pour lequel la vitesse et la direction sont constantes durant plusieurs heures. En fait, afin de bien représenter les effets de seiches, de dénivellation due au vent et de la durée du vent, il est préférable de modéliser ces effets sur les plans d'eau en effectuant des simulations d'écoulement non permanent. L'objectif principal de ce chapitre est d'effectuer, à partir d'un modèle hydrodynamique 2D calibré, des simulations d'écoulement non permanent affecté par l'effet du vent en système fermé. Les conditions en système fermé permettent de séparer l'effet du vent sur le réservoir afin d'étudier son impact indépendamment de toutes les autres sources d'erreurs externes pouvant affecter la lecture des limnimètres. En d'autres mots, les apports naturels  $A_n$ , le débit turbiné  $Q_T$  et le débit déversé  $Q_D$  sont négligés. Tout au long de la simulation, le volume d'eau est conservé puisqu'il n'y a pas de débit d'entrée et de sortie. Toutefois, le vent déforme le plan d'eau et des variations de niveaux se produisent à l'endroit des limnimètres. Dépendamment de la position des instruments et de la méthode de combinaison utilisée, une erreur de volume peut être introduite dans l'équation de bilan hydrique. En appliquant la méthode de combinaison par pondération arithmétique sur les niveaux simulés obtenus par les simulations en système fermé, il est possible de poser un premier diagnostic pour les réservoirs Gouin et Outardes 4 afin de déterminer l'incertitude due au vent dans l'équation de bilan hydrique.

Pour arriver à l'objectif ciblé, ce chapitre présente la préparation des modèles hydrodynamiques d'Outardes 4 et de Gouin et les résultats obtenus suite aux simulations en système fermé.

### 5.2 Préparation du modèle d'Outardes 4

La préparation du modèle d'Outardes 4 consiste à effectuer l'analyse de sensibilité du maillage, du coefficient de rugosité, de la diffusion de la turbulence, d'effectuer le choix du pas de temps de calcul et d'effectuer la calibration du modèle en mode non permanent.

### 5.2.1 Analyse de sensibilité du maillage

Dépendamment de l'ampleur du domaine étudié, le temps de calcul des simulations hydrodynamiques 2D peut devenir considérable si la grille de calcul est dense. Il est préférable à ce moment d'effectuer une analyse de sensibilité du maillage. Cette analyse consiste à élaborer différents maillages de densité variée. Si les résultats obtenus avec une grille de calcul moins dense sont comparables à ceux obtenus avec une grille de calcul plus dense, le maillage moins dense sera retenu pour le reste de la démarche. Ultimement, cette analyse permet de minimiser les erreurs d'arrondis dans la résolution des équations de la dynamique des fluides et d'économiser du temps de calcul qui peut être précieux lors d'échéanciers serrés.

La sensibilité du maillage a été effectuée par une simulation hydrodynamique en conditions frontières sèches en appliquant un forçage de vent uniforme de 20 km/h orienté vers le nord géographique. Cette simulation a été effectuée sur trois maillages de densités différentes : 39 000 nœuds, 142 000 nœuds et 300 000 nœuds. La comparaison des niveaux d'eau simulés obtenus est présentée à la Figure 5-1.

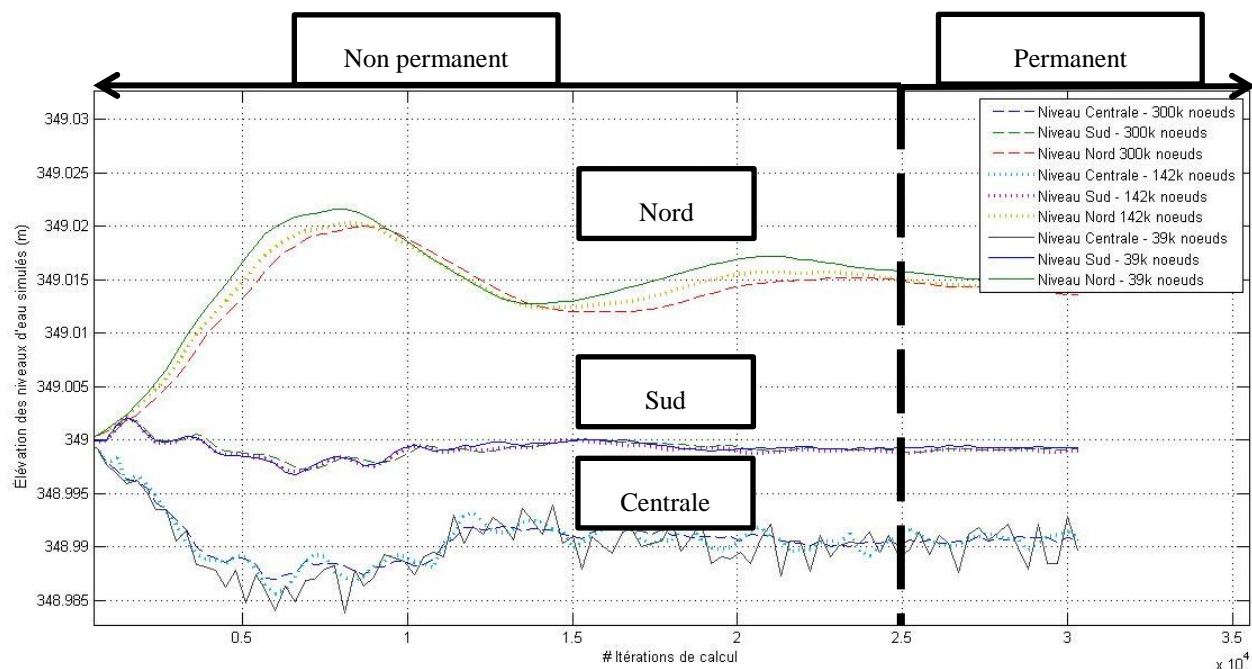


Figure 5-1 Analyse de sensibilité du maillage pour le réservoir Outardes 4 à un pas de temps d'une seconde

On peut remarquer que la simulation est instable pour le maillage à 39 000 nœuds à l'endroit du limnimètre près de la centrale. Les maillages de 300 000 et 142 000 nœuds donnent des résultats similaires à l'état permanent comme à l'état non permanent. Le maillage de 142 000 nœuds a été retenu pour le reste de la démarche.

## 5.2.2 Analyse de sensibilité du coefficient de rugosité de Manning

Le coefficient de rugosité de Manning est le paramètre d'ajustement le plus commun pour la calibration de modèles hydrodynamiques,. Il est important de vérifier son impact sur les résultats d'une simulation lorsque le forçage par le vent est inclus. Trois simulations avec des coefficients de Manning différents ont été effectuées avec forçage de vent uniforme de 20 km/h orienté vers le nord géographique.

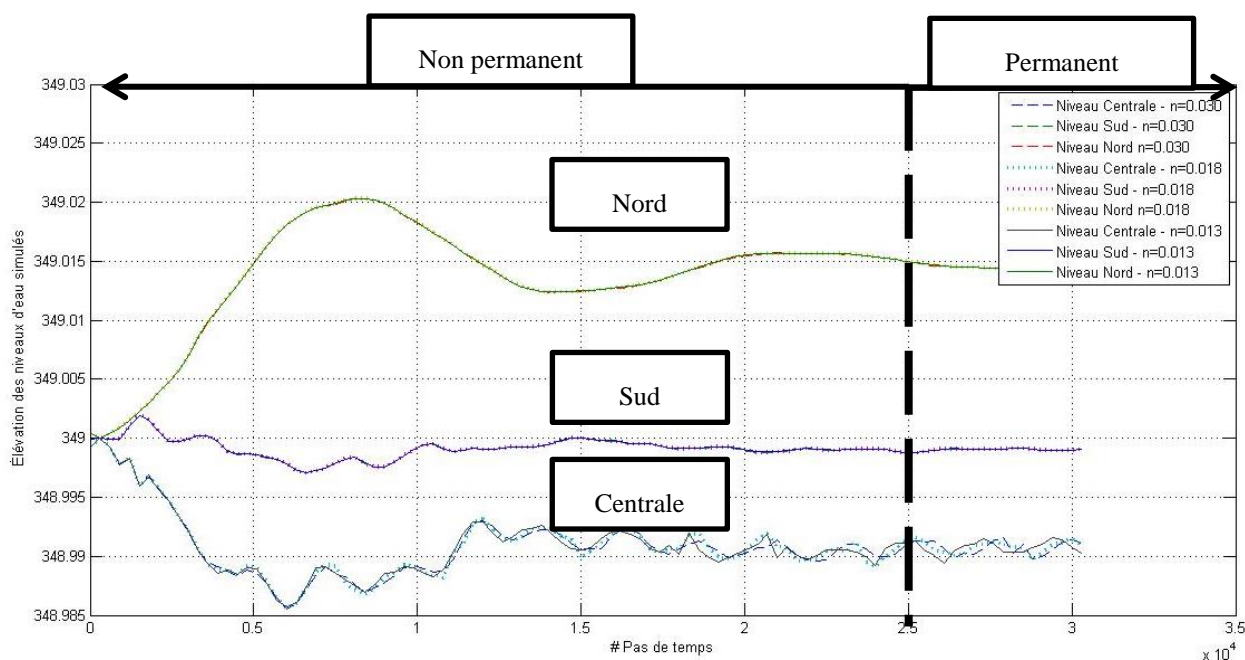


Figure 5-2 Analyse de sensibilité du coefficient de Manning pour le réservoir Outardes 4 à un pas de temps d'une seconde

En raison de la grande profondeur moyenne du réservoir Outardes 4 (voir Figure 4-13 b), on peut observer à la Figure 5-2 que le paramètre de Manning n'a aucune influence à l'état

permanent comme à l'état non permanent. Ce paramètre ne sera donc pas utile lors de la calibration du modèle.

### 5.2.3 Analyse de sensibilité de la diffusion de la turbulence

La sensibilité du coefficient de diffusion turbulente, aussi appelé diffusion des vitesses dans TELEMAC-2D a été étudiée en effectuant trois simulations en conditions frontières sèches avec des coefficients de diffusion différents. Le modèle a été forcé par un vent uniforme de 20 km/h orienté vers le nord géographique. La direction du vent a été sélectionnée dans le but de maximiser les différences de niveaux entre les limnimètres (voir Tableau 4-6).

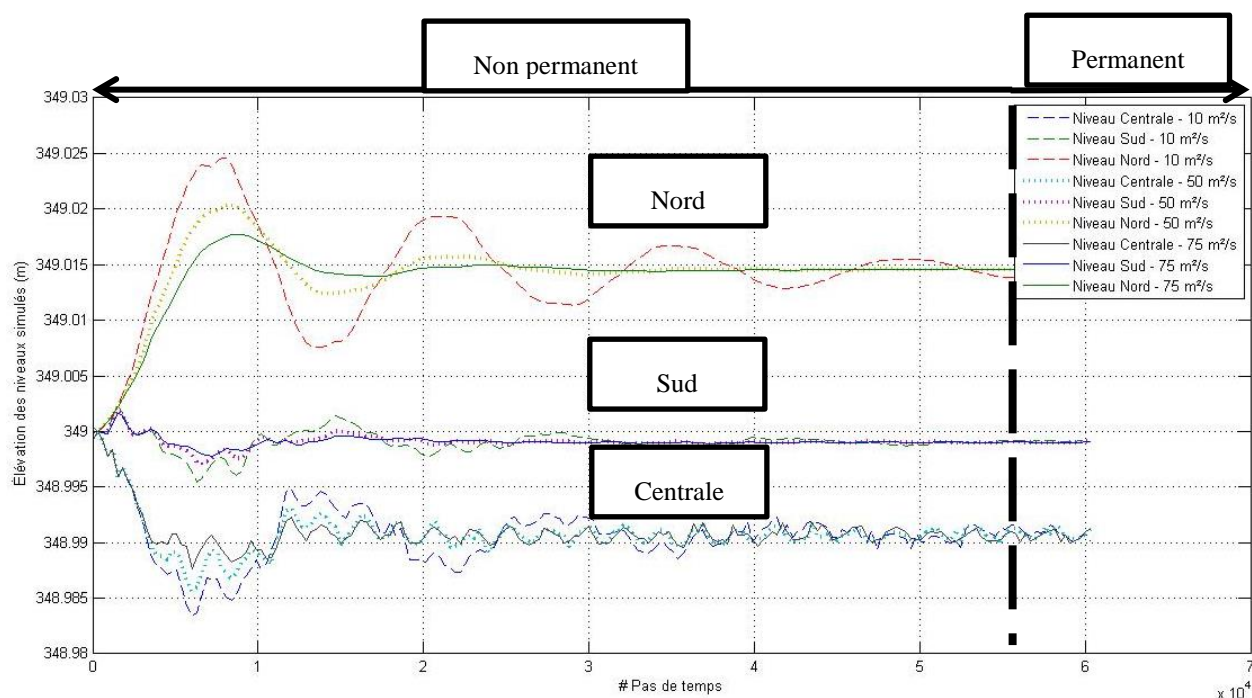


Figure 5-3 Analyse de sensibilité du coefficient de diffusion des vitesses pour le réservoir Outardes 4 à un pas de temps d'une seconde

On peut remarquer à la Figure 5-3 que le coefficient de diffusion des vitesses a une grande influence sur les niveaux simulés à l'état non permanent. Toutefois, lorsque la simulation est stabilisée à l'état permanent, ce coefficient n'a plus d'impact. Ensuite, plus ce coefficient est élevé, plus l'état permanent est atteint rapidement. De plus, à l'état non permanent et avec un coefficient de traînée du vent constant, plus le coefficient de diffusion est faible, plus la

dénivellation due au vent est grande entre les limnimètres. À la lumière de ces résultats, il est possible de conclure que ce paramètre sera très important lors de la calibration du modèle en non-permanent autant pour simuler la dénivellation due au vent que pour simuler les effets de forces inertielles et des seiches.

#### 5.2.4 Choix du pas de temps

Avant d'effectuer une simulation hydrodynamique, il est nécessaire d'effectuer un choix pour le pas de temps de calcul du modèle. Généralement, le choix du pas de temps en modélisation hydraulique ou hydrodynamique est contraint par la condition de Courant. Cette condition en une dimension s'exprime par la relation suivante :

$$\Delta t \leq \frac{C_{FL} \Delta x}{u} \quad (4.1)$$

Où

$\Delta t$  est le pas de temps utilisé dans une simulation d'écoulement

$C_{FL}$  est le nombre de Courant. La résolution des équations d'écoulement peut devenir instable lorsque ce nombre dépasse 1.

$\Delta x$  est la distance que parcourt le fluide en mouvement

$u$  est la vitesse du fluide

La condition de Courant peut être très restrictive à l'égard du pas de temps de la simulation lorsqu'un schéma de calcul explicite est utilisé. Toutefois, lorsqu'un schéma entièrement implicite est sélectionné, cela permet de s'affranchir de cette condition. Plus le pas de temps choisi est grand, plus la durée de la simulation en temps réel sera courte. Toutefois, lorsqu'un trop grand pas de temps est choisi, dépendamment de la densité du maillage, il se peut que le solveur numérique du modèle ne parvienne pas à converger vers une solution en raison d'un trop grand nombre d'itérations requis par le solveur. Il est donc préférable d'éviter ce type de situation à tout prix. Idéalement, il serait préférable de choisir un pas de temps de calcul qui se rapproche des intervalles de mesures des instruments de niveaux et de vent qui sont fournis aux Tableau 4-5 et Tableau 4-7. Toutefois, les intervalles de temps de prise de mesure peuvent être beaucoup trop grands pour être utilisé comme pas de temps de calcul. Afin d'éclairer le

choix du pas de temps pour le modèle d'Outardes 4 à 142 000 nœuds, plusieurs simulations d'une durée de 24 h en temps de simulation à différents pas de temps de calcul ont été effectuées en forçant le modèle par un vent constant et uniforme de 20 km/h orienté vers le nord géographique (voir Figure 5-4).

On peut voir sur cette figure qu'un pas de temps de calcul de 40 secondes est la discrétisation temporelle maximale requise pour que la solution converge en condition de vent uniforme et permanent. Toutefois, en condition d'écoulement non permanent, il est préférable d'utiliser un pas de temps bien en deçà de cette valeur afin de s'assurer que le solveur ne diverge pas. On peut également remarquer qu'au-delà d'un pas de temps de 15 secondes, il n'y a plus vraiment de gain en temps de calcul réel puisqu'un trop grand nombre d'itérations sont nécessaires pour la convergence de la solution. Un pas de temps de 15 secondes a donc été sélectionné pour le reste de la démarche.

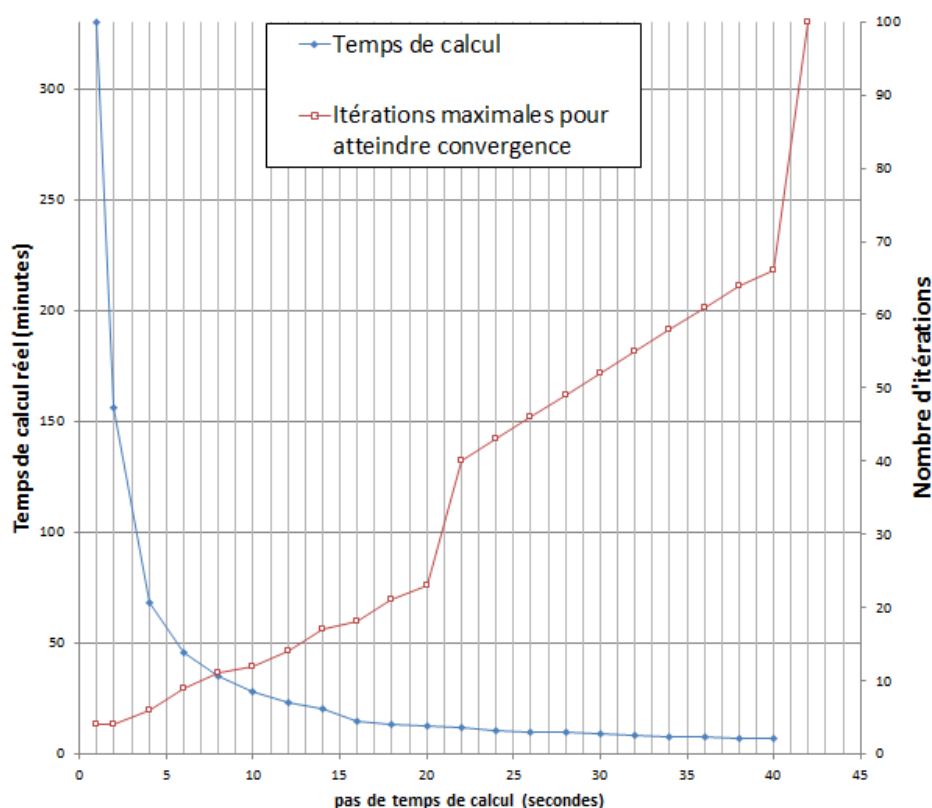


Figure 5-4 Choix du pas temps en fonction du temps de calcul réel et du nombre d'itérations maximales requises par le solveur numérique pour atteindre la convergence – Modèle d'Outardes 4 à 142 000 nœuds

### 5.2.5 Vérification des courants causés par un vent constant

Il peut être intéressant de vérifier les vitesses et directions des courants lorsque le réservoir est soumis à un vent constant. Cela peut permettre d'assurer la validité du modèle. Les courants à l'état permanent près des limnimètres d'Outardes 4 générés par un vent constant de 20 km/h provenant du Nord sont illustrés à la Figure 5-5, à la Figure 5-6 et à la Figure 5-7.

On peut remarquer qu'à l'état permanent, la vitesse des courants est très faible (inférieurs à 10 cm/s). Près du limnimètre amont, les vitesses sont presque nulles. Par rapport aux directions des courants, on peut remarquer quelques zones de recirculation près des limnimètres Nord et Sud.

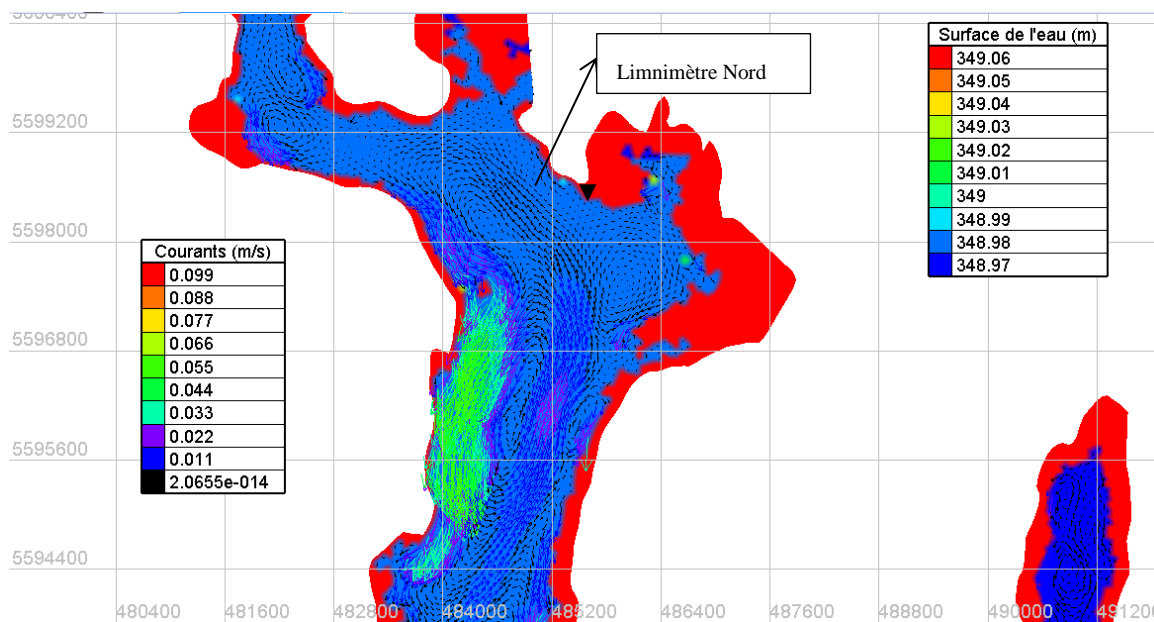


Figure 5-5 Courants en état permanent dans le réservoir Outardes 4 près du limnimètre Nord pour un vent constant de 20 km/h provenant du Nord - Système de coordonnées UTM zone 19 avec un datum NAD83

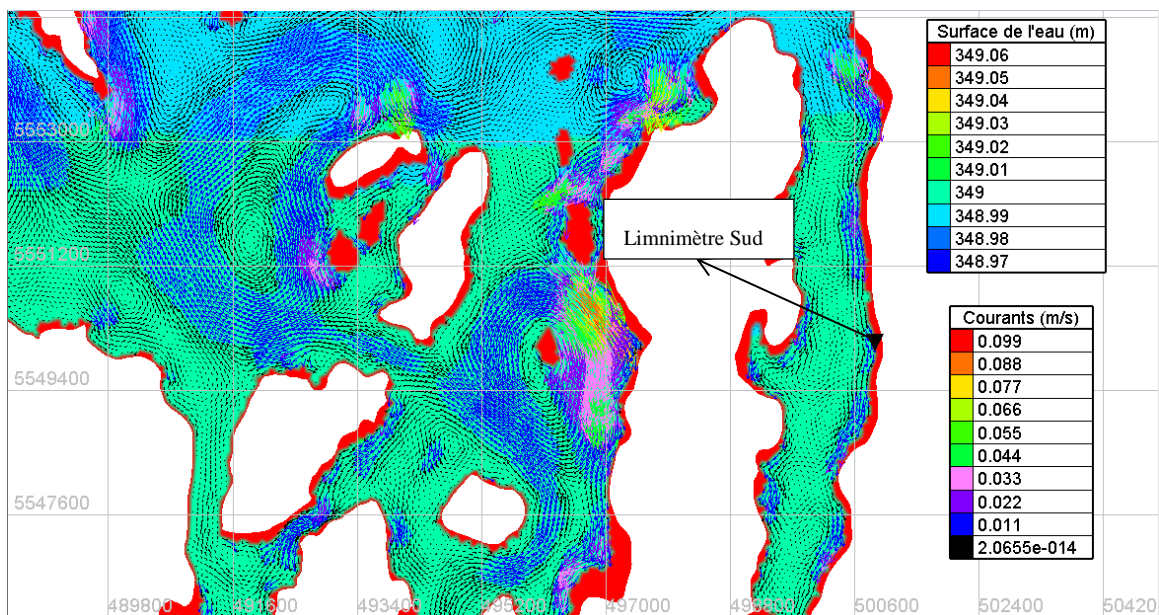


Figure 5-6 Courants en état permanent dans le réservoir Outardes 4 près du limnimètre Sud pour un vent constant de 20 km/h provenant du Nord - Système de coordonnées UTM zone 19 avec un datum NAD83

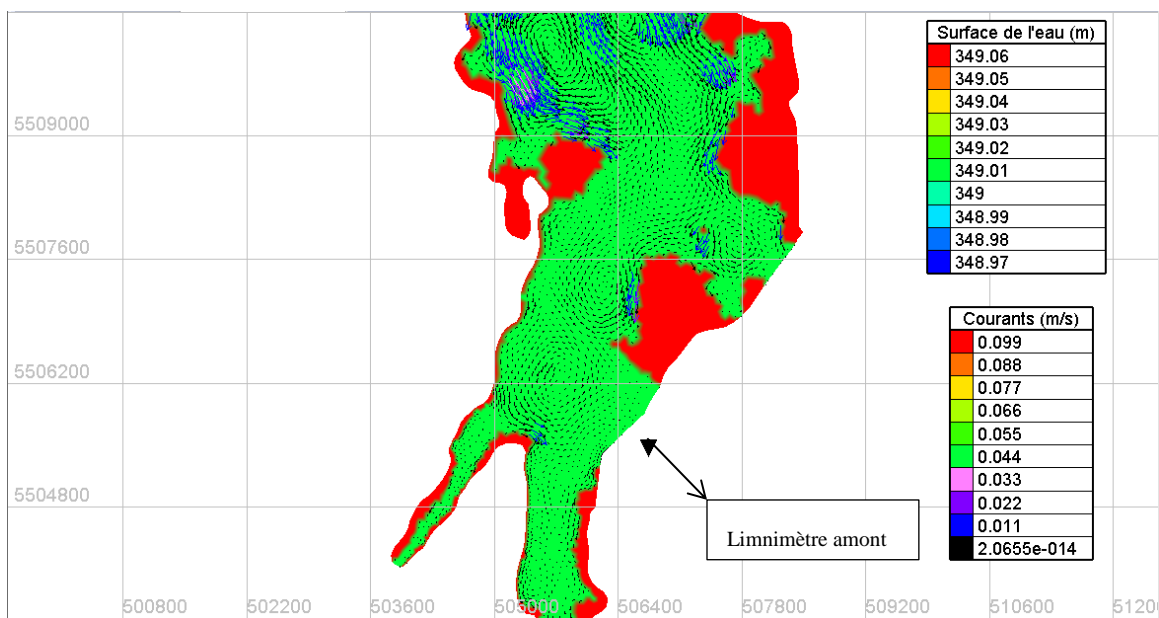


Figure 5-7 Courants en état permanent dans le réservoir Outardes 4 près du limnimètre amont pour un vent constant de 20 km/h provenant du Nord - Système de coordonnées UTM zone 19 avec un datum NAD83

De plus, les vitesses maximales atteintes par les courants durant la phase transitoire sont présentées à la Figure 5-8.

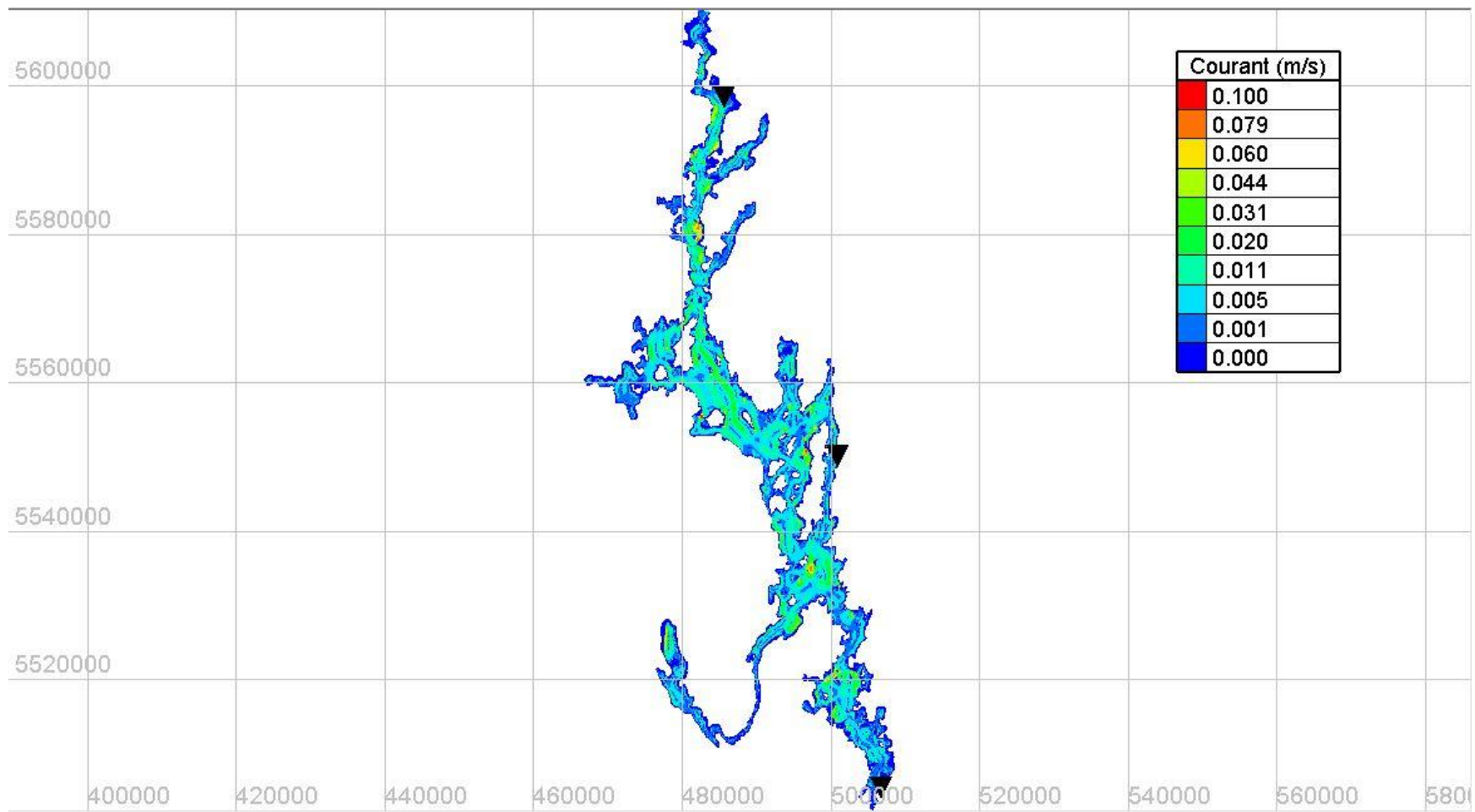


Figure 5-8 Vitesses maximales atteintes par les courants durant la phase transitoire de la simulation pour le réservoir Outardes 4

Les courants maximaux générés par un vent de 20 km/h provenant du Nord sont de l'ordre de 10 cm/s. Toutefois, les courants obtenus ne proviennent pas d'un modèle calibré. Il est important d'effectuer une calibration afin de s'assurer que le modèle est représentatif des données mesurées.

## 5.2.6 Calibration du modèle

### 5.2.6.1 Procédure de calibration

L'analyse de sensibilité effectuée aux sections 5.2.1 à 5.2.4 a permis de constater que le coefficient de diffusion de la turbulence est le paramètre le plus important à calibrer afin que le modèle d'Outardes 4 soit représentatif des séries observées. La procédure de calibration est la suivante :

1. Sélectionner, parmi les données disponibles, un mois qui présente des épisodes de forts vents orientés dans les axes théoriques (voir Tableau 4-6) où la dénivellation due au vent est supposée être maximale.
2. Effectuer une simulation en condition d'écoulement permanent afin de générer la condition initiale qui est représentative du début de la première journée du mois sélectionné.
3. En utilisant la relation linéaire du coefficient de traînée du vent de Wu (1980) (voir Tableau 2-2), effectuer différentes simulations du mois choisi, à la suite de la condition initiale précédemment générée, avec différents coefficients de diffusion de la turbulence. Les critères de calibration sont :
  - a. Minimiser la racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) du niveau combiné simulé par rapport au niveau combiné observé. Les calculs des niveaux combinés sont effectués par l'équation (2.5) en considérant une pondération arithmétique de chaque instrument.
  - b. L'amplitude de l'écart type de la variation du niveau combiné (voir équation 2.15). L'écart type de la variation du niveau combiné détermine si le signal d'apport naturel est affecté par les vents/manœuvres (Haché et al., 2003). L'écart type de la variation du niveau combiné simulé  $\sigma(\Delta N_{c, \text{sim}})$  doit donc se

rapprocher de l'écart type de la variation du niveau combiné observé  $\sigma(\Delta N_{c,obs})$ .

### 5.2.6.2 Hypothèses et justifications pour la modélisation

La procédure de calibration présentée à la section précédente nécessite d'effectuer certains choix et d'admettre certaines hypothèses :

- Le mois d'octobre 2010 a été sélectionné pour la procédure de calibration. Les données de ce mois qui seront utilisées pour forcer les simulations de calibration sont présentées à la Figure 5-9.
- Puisqu'il n'y a qu'une seule station météorologique installée au réservoir, la vitesse et la direction du vent sont appliquées de façon uniforme sur tout le domaine.
- Les apports filtrés de SPAN (série officielle d'Hydro-Québec) sont utilisés à la condition frontière amont alors que le débit turbiné est utilisé à la condition frontière aval (voir Figure 5-10 b).
- Les déformations de niveaux combinés dues à la force de Coriolis, aux effets de la pression atmosphérique et à la propagation des vagues de courte période sont négligées.
- La condition initiale est générée par une simulation d'écoulement permanent. La condition initiale est obtenue lorsque les résultats de la simulation sont stabilisés et ne varient plus dans le temps. Les conditions frontières sont constantes durant toute la durée et sont présentées à la Figure 5-10 (a). Il est supposé que la condition initiale est conditionnée au débit turbiné du 2010/10/01 introduit en amont du modèle et au niveau enregistré le 2010/10/01 près de la centrale à la sortie aval du modèle.

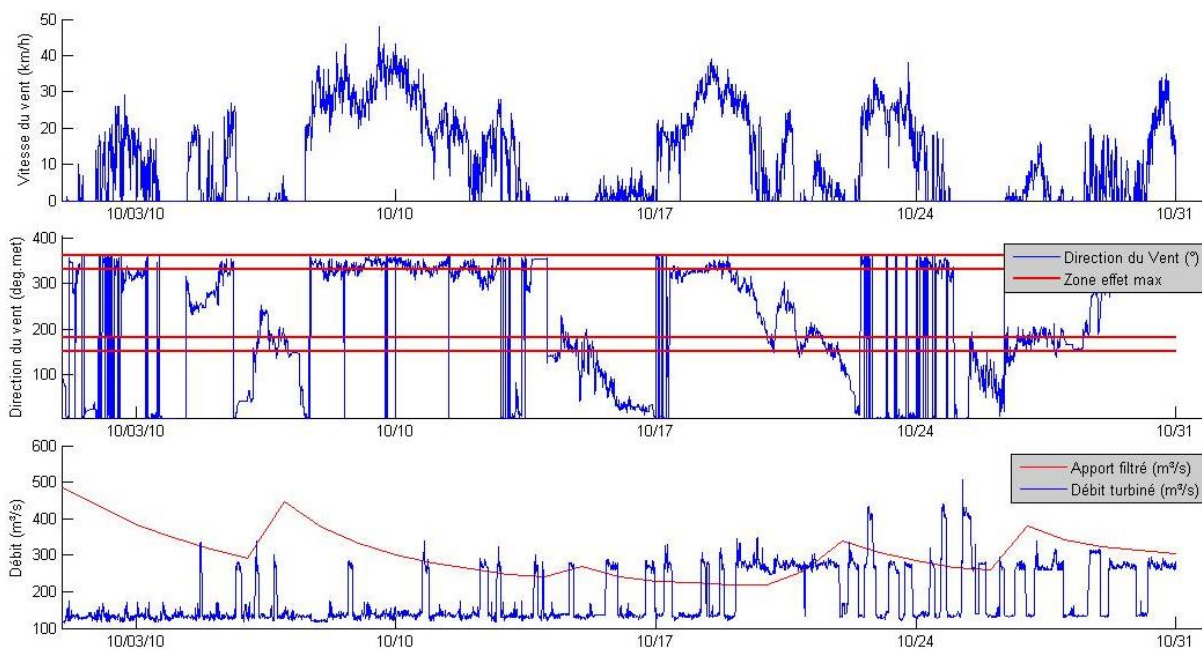


Figure 5-9 Données de forçage du modèle d'Outardes 4 pour le mois d'octobre 2010 pour les simulations de calibration

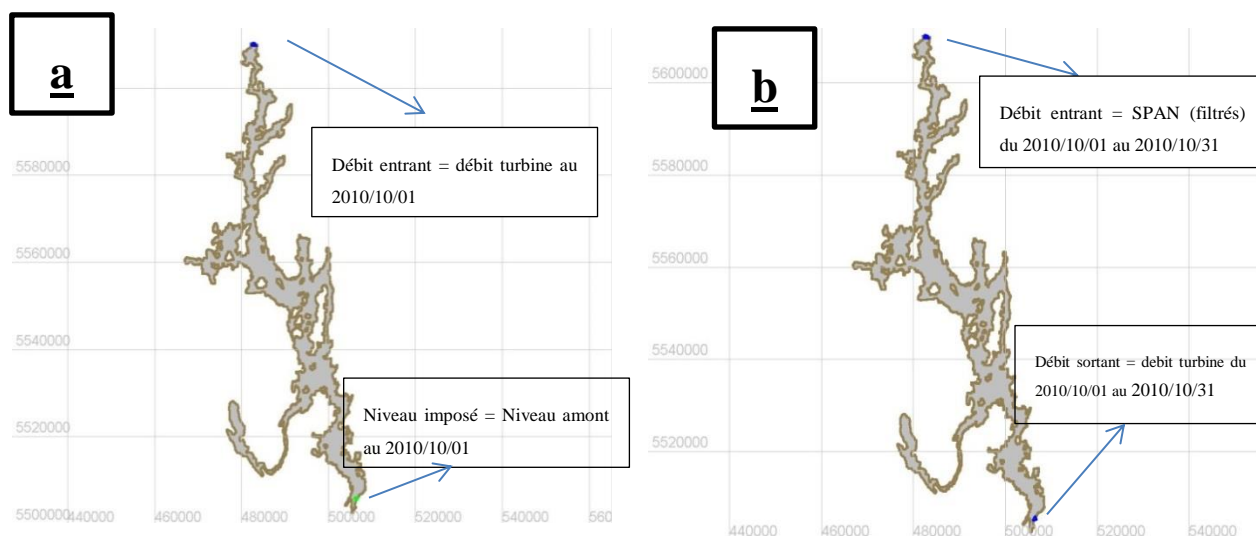


Figure 5-10 Conditions frontières d'Outardes 4 pour générer la condition initiale (a) et pour effectuer les simulations de calibration (b)

### 5.2.6.3 Vérification des courants de l'état initial

La condition initiale du modèle est obtenue en effectuant une simulation en état permanent. Cette condition initiale est obtenue en imposant un débit de  $138 \text{ m}^3/\text{s}$  à l'amont (voir Figure 5-11) et un niveau de 346,11 m à l'aval du modèle (Figure 5-13). La section d'écoulement sur toute la longueur du réservoir est tellement grande que les courants générés par un débit de  $138 \text{ m}^3/\text{s}$  sont très faibles (de l'ordre de 1 cm/s). Des vitesses de courants plus élevées pourraient être observées lors du passage d'une pointe de crue ou lors d'épisode de vent intense alors que la simulation n'est pas stabilisée à l'état permanent. Les courants près des limnimètres générés par un débit de  $138 \text{ m}^3/\text{s}$  à l'état permanent sont présentés de la Figure 5-11 à la Figure 5-13. On peut observer à ces figures que la trajectoire des courants est correctement acheminée jusqu'à l'aval du modèle. De plus, les vitesses les plus élevées sont de l'ordre de 3 cm/s. Ces vitesses maximales ont été obtenues près de la condition frontière amont là où il y a un rétrécissement de la section d'écoulement (Figure 5-11).

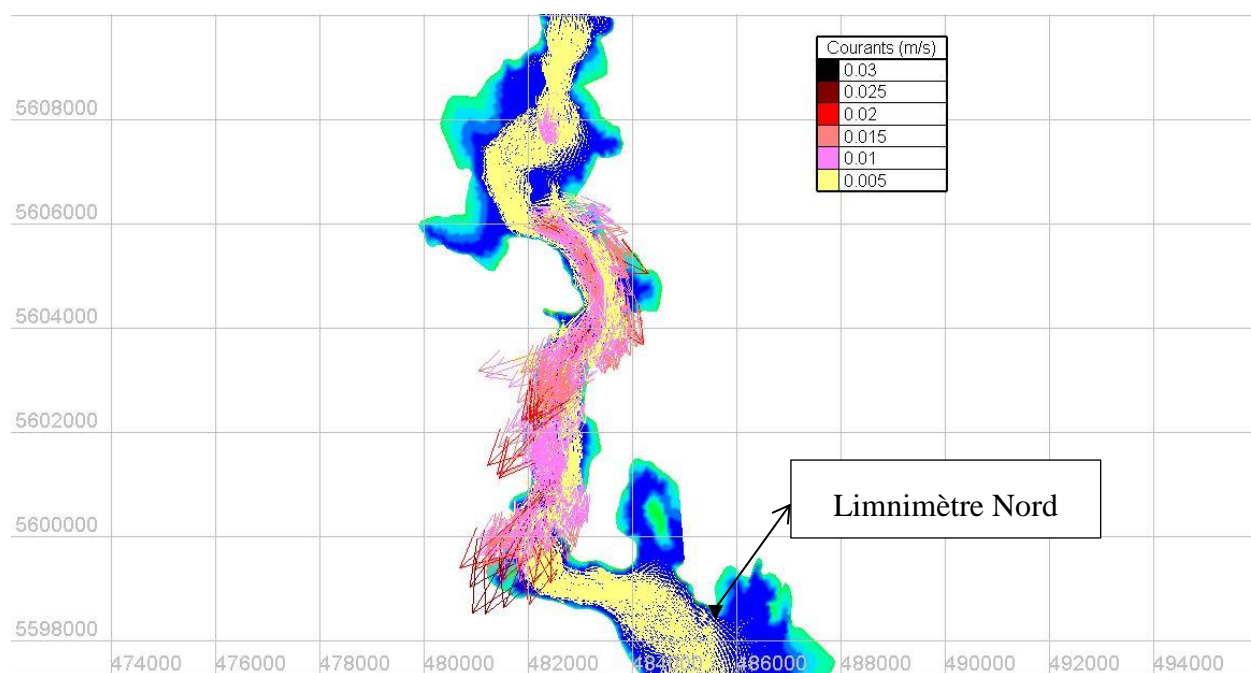


Figure 5-11 Courant de la condition initiale d'Outardes 4 près du limnimètre Nord– Système de coordonnées UTM zone 19 avec un datum NAD83

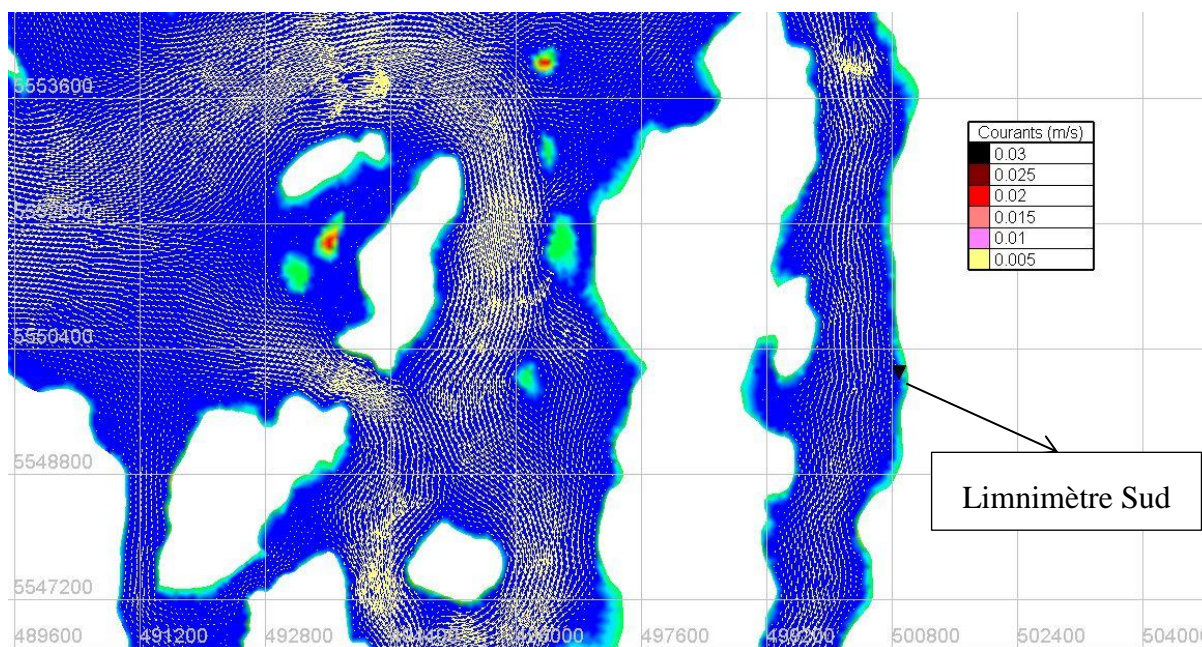


Figure 5-12 Courant de la condition initiale d'Outardes 4 près du limnimètre Sud– Système de coordonnées UTM zone 19 avec un datum NAD83

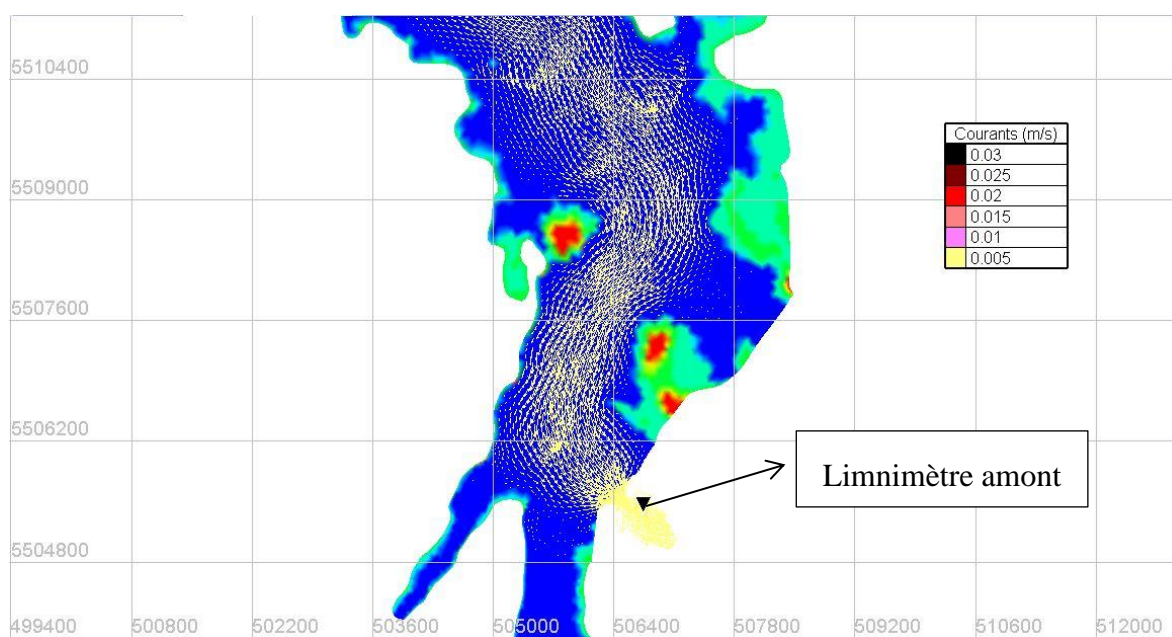


Figure 5-13 Courant de la condition initiale d'Outardes 4 près du limnimètre amont– Système de coordonnées UTM zone 19 avec un datum NAD83

#### 5.2.6.4 Résultats de calibration

Les résultats des simulations de calibration obtenus en suivant la procédure décrite à la section 5.2.6.1 sont présentés au Tableau 5-1. Le niveau combiné simulé et la variation du niveau combiné simulé obtenus à partir du meilleur jeu de paramètres de calibration sont présentés à la Figure 5-14. À l'aide du meilleur jeu de paramètres, une simulation additionnelle sans vent a été effectuée. Le bénéfice obtenu en incluant l'effet du vent à la simulation est indiqué à la Figure 5-14 et au Tableau 5-1.

De plus, on peut remarquer au Tableau 5-1 qu'un coefficient de diffusion de turbulence de  $5 \text{ m}^2/\text{s}$  avec un coefficient de traînée du vent obtenu par la formulation de Wu (1980) donne les meilleurs résultats autant pour représenter le niveau combiné observé que pour représenter l'écart-type de la variation du niveau combiné. On remarque également que plus le coefficient de diffusion de turbulence augmente, moins l'écart-type de la variation du niveau combiné simulé est représentative de celui des observations.

Finalement, pour le meilleur jeu de paramètres, la simulation qui n'inclut pas la force du vent représente moins bien les données observées (niveau combiné et l'écart-type de sa variation) que la simulation qui les inclut.

Tableau 5-1 Résultats des simulations de calibration d'Outardes 4 en fonction des indicateurs de performance décrits à la section 5.2.6.1

Sommaire de la calibration			Indicateurs de performance		
Type de série	Coefficient de diffusion de la turbulence (m <sup>2</sup> /s)	Coefficient de traînée du vent (--)	RMSE $N_{c,sim}$ VS $N_{c,obs}$ (cm) **	$\sigma(\Delta N_c)$ (m)	$\sigma(\Delta N_{c,obs}) - \sigma(\Delta N_{c,sim})$ (m) **
Observée	--	--	--	0.0011	--
Simulée	1	Variable *	2.86	0.0012	-0.0001
Simulée	2	Variable *	2.7	0.0011	0.0000
Simulée	4	Variable *	1.29	0.0011	0.0000
<b>Simulée</b>	<b>5</b>	<b>Variable *</b>	<b>1.04</b>	<b>0.0010</b>	<b>0.0001</b>
Simulée	6	Variable *	1.91	0.0010	0.0001
Simulée	8	Variable *	1.14	0.0009	0.0002
Simulée	10	Variable *	1.87	0.0009	0.0002
Simulée	15	Variable *	1.53	0.0009	0.0002
Simulée	20	Variable *	1.3	0.0009	0.0002
Simulée	5	0 ***	1.44	0.0007	0.0004

**Légende :**

\* Coefficient de traînée du vent selon la formulation de Wu (1980), voir Tableau 2-2

\*\* Plus le score est près de 0, plus la simulation est représentative de la série observée

\*\*\* Simulation sans vent

**Scénario et paramètre retenu**

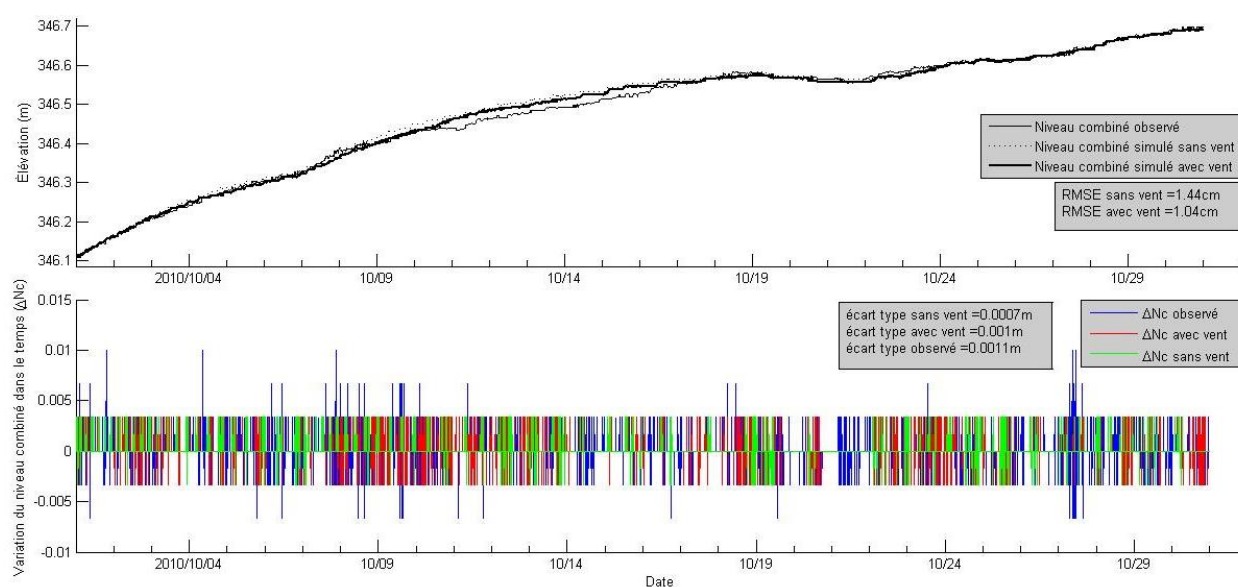


Figure 5-14 Simulation de calibration d'Outardes 4 pour la période de 2010/10/01 à 2010/10/31

### 5.3 Simulation en système fermé d'Outardes 4

La simulation en système fermé consiste à effectuer une simulation avec le jeu de paramètres de calibration optimal du mois d'octobre 2010 en incluant seulement les effets du vent. Les apports et le débit sortant sont donc négligés. La simulation est effectuée au niveau d'exploitation moyen du mois d'octobre 2010. Puisqu'il n'y a pas d'entrées/sorties d'eau, le volume d'eau est conservé. Toutefois, à l'endroit des limnimètres, le plan d'eau se déforme selon les forces du vent et les forces inertielles. Pour la période étudiée, à partir des niveaux simulés en système fermé, il est possible de calculer l'incertitude ou l'erreur d'apport naturel en  $\text{m}^3/\text{s}$  avec l'équation de bilan hydrique en admettant une pondération arithmétique (voir les équations 2.3, 2.4 et 2.5). Seulement le terme  $\Delta S$  est calculé puisque les autres sont négligés par l'hypothèse de système fermé. La conversion du niveau combiné simulé en volume d'eau est effectuée à partir de la courbe d'emménagement officielle d'Hydro-Québec (voir Figure 4-13 c). Une estimation de l'incertitude de l'apport naturel due à l'effet du vent durant le mois d'octobre 2010 est présentée à la Figure 5-15.

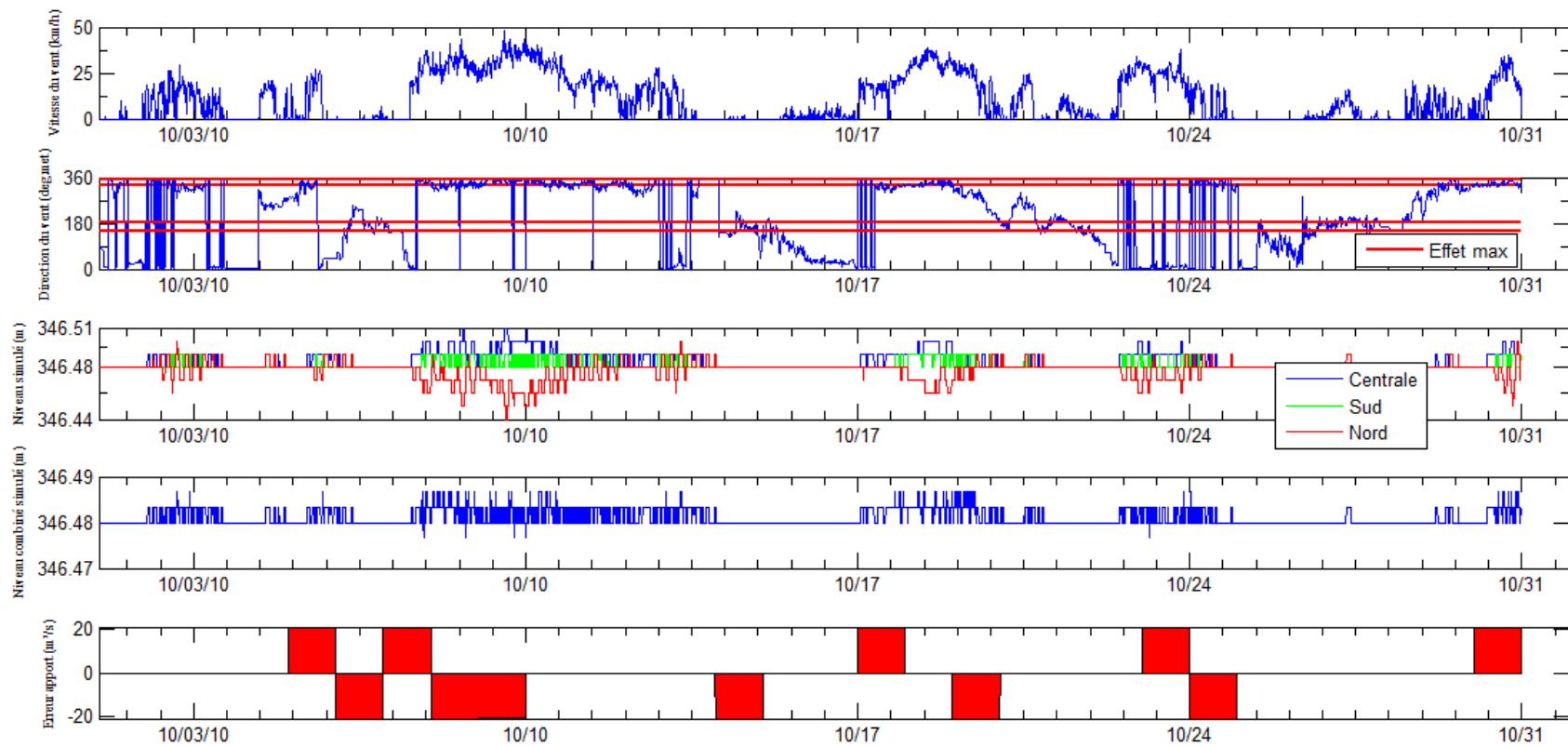


Figure 5-15 Estimation par simulation en système fermé de l'incertitude de l'apport naturel due à l'effet du vent pour le mois d'octobre 2010 à Outardes 4

On remarque à la Figure 5-15 que l'incertitude du vent sur le calcul d'apport naturel par bilan hydrique est de l'ordre de 21 m<sup>3</sup>/s pour le mois d'octobre 2010. Ce mois a été sélectionné puisqu'il présentait des épisodes de vent frôlant les 50 km/h orientés dans l'axe reliant les limnimètres. À la lumière de ces résultats, puisque les erreurs de vent surviennent à quelques journées bien précises où l'effet du vent était majeur, on peut s'attendre à une erreur quasiment nulle à d'autres périodes de l'historique. On remarque également que les niveaux aux limnimètres sud et à la centrale varient dans la direction inverse par rapport au limnimètre nord. Finalement, il ne semble pas y avoir de lien entre le signe de l'erreur d'apport (+ ou -) et la direction du vent. Ceci peut être causé par les forces inertielles qui agissent sur le plan d'eau lorsque la vitesse de vent ou sa direction varie brusquement. Le cas échéant, un mouvement oscillatoire du plan d'eau est déclenché jusqu'au retour à l'équilibre. Dépendamment de la durée de retour à l'équilibre, les forces inertielles peuvent ajouter une erreur additionnelle dans le calcul d'apport par bilan hydrique.

## **5.4 Préparation du modèle de Gouin**

La préparation du modèle de Gouin consiste à effectuer l'analyse de sensibilité du maillage, du coefficient de rugosité, de la diffusion de la turbulence, d'effectuer le choix du pas de temps de calcul et d'effectuer la calibration du modèle en mode non permanent.

### **5.4.1 Analyse de sensibilité du maillage**

De la même façon que pour l'analyse de sensibilité du maillage à Outardes 4, la sensibilité du maillage du modèle de Gouin a été effectuée par une simulation hydrodynamique en conditions frontières sèches en appliquant un forçage de vent uniforme de 20 km/h orienté vers le nord géographique lorsque le réservoir est à sa cote maximale d'exploitation (405.08 m). Cette simulation a été effectuée sur trois maillages de densités différentes : 147 000 nœuds, 236 000 nœuds et 394 000 nœuds. La comparaison des niveaux d'eau simulés obtenus est présentée à la Figure 5-16.

Afin d'étudier la complexité de la bathymétrie du réservoir, des simulations d'analyse de sensibilité de maillage similaires aux précédentes ont été effectuées en considérant le niveau du réservoir à la cote de 400 m. On peut remarquer à la Figure 5-17 que pour la même vitesse et la même direction de vent, les niveaux simulés varient différemment selon le niveau d'eau initial de

la simulation. Pour cette raison, le niveau d'exploitation du réservoir devrait être considéré dans la simulation des effets du vent sur ce réservoir.

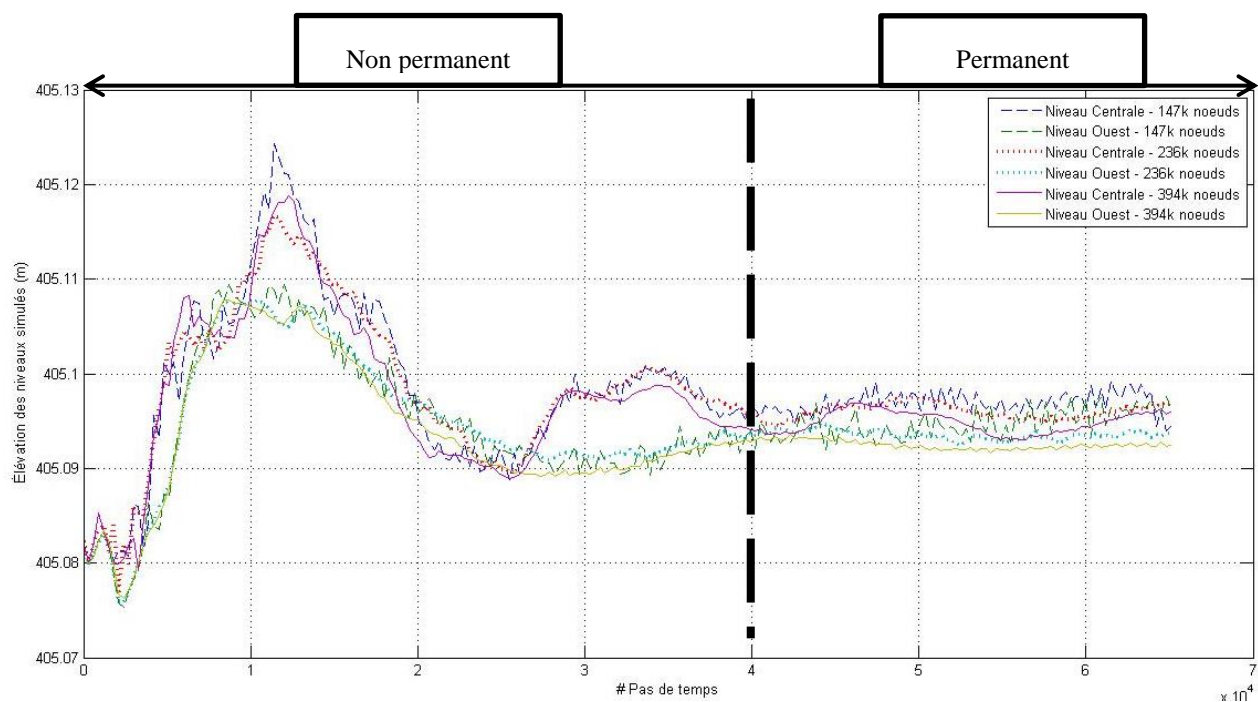


Figure 5-16 Analyse de sensibilité du maillage pour le réservoir Gouin au niveau initial de 405.08 m à un pas de temps d'une seconde

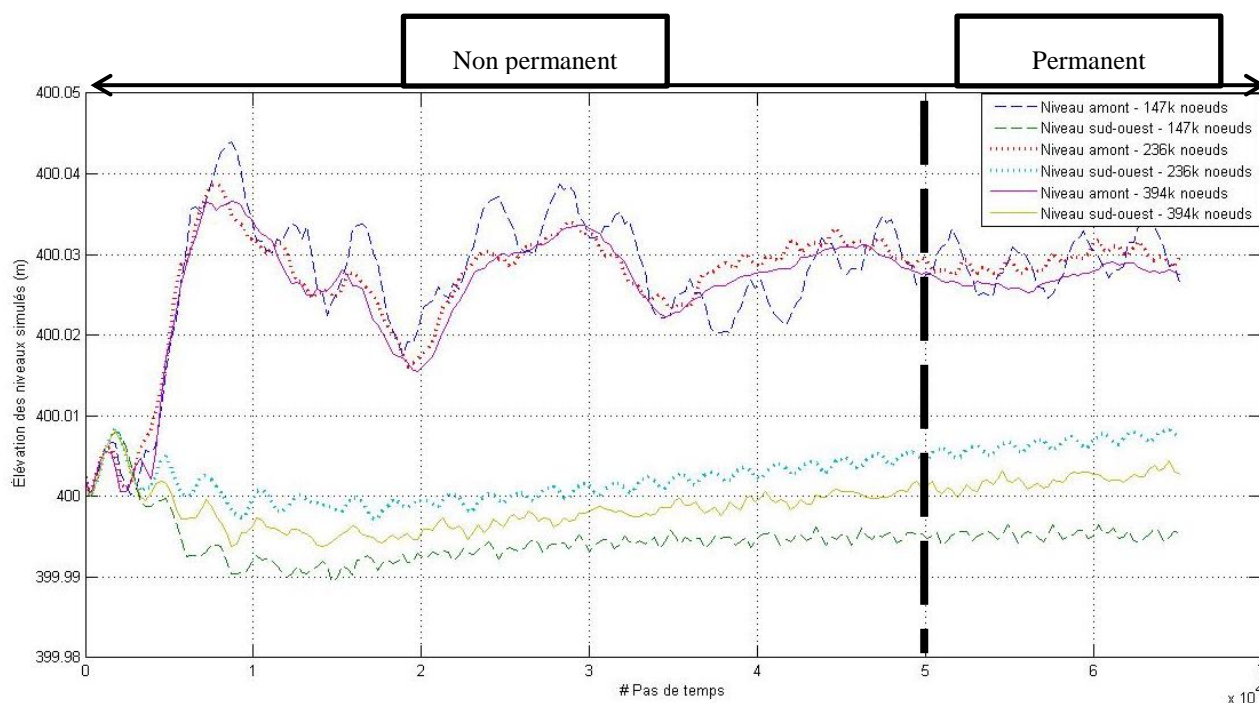


Figure 5-17 Analyse de sensibilité du maillage pour le réservoir Gouin au niveau initial de 400 m à un pas de temps d'une seconde

On remarque aux figures précédentes que le maillage de 147 000 nœuds donne une réponse plutôt bruitée alors que les maillages de 236 000 et 394 000 nœuds ont une réponse similaire. Le maillage de 236 000 nœuds a été sélectionné pour le reste de la démarche.

#### 5.4.2 Analyse de sensibilité du coefficient de rugosité

La sensibilité du coefficient de rugosité du modèle de Gouin a été effectuée par des simulations hydrodynamiques en conditions frontières sèches en appliquant un forçage de vent uniforme de 20 km/h orienté vers l'ouest géographique lorsque le réservoir est à sa cote maximale d'exploitation (405.08 m). Ces simulations ont été effectuées selon trois coefficients de rugosité de Manning différents : 0.030, 0.018 et 0.013. La comparaison des niveaux d'eau simulés obtenus est présentée à la Figure 5-18.

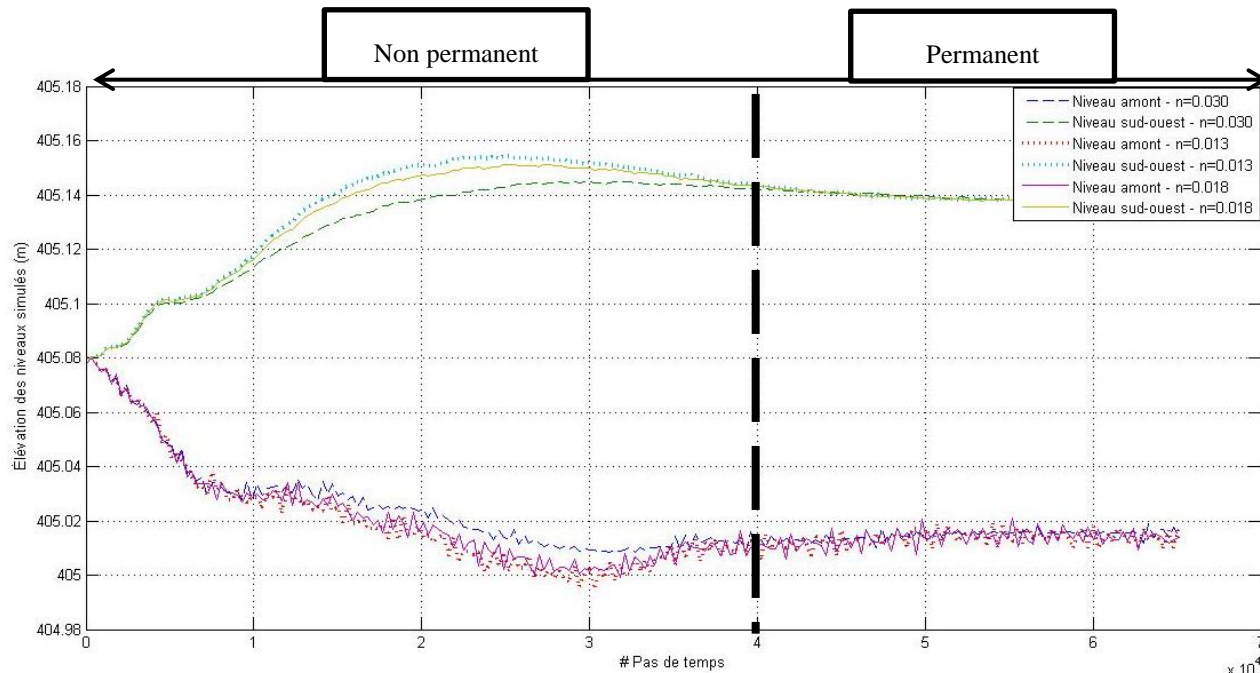


Figure 5-18 Analyse de sensibilité du coefficient de Manning pour le modèle du réservoir Gouin à un pas de temps d'une seconde

On remarque à la figure précédente que les coefficients de Manning utilisés ont un effet différent en écoulement non permanent. Lorsque les résultats de la simulation sont stabilisés à l'écoulement permanent, on remarque que le coefficient de Manning n'a plus d'influence. Le coefficient de Manning aura donc une certaine importance lors de la calibration du modèle en écoulement non permanent.

### 5.4.3 Analyse de sensibilité de la diffusion de turbulence

La sensibilité du coefficient de diffusion de la turbulence du modèle de Gouin a été effectuée par des simulations hydrodynamiques en conditions frontières sèches en appliquant un forçage de vent uniforme de 20 km/h orienté vers l'ouest géographique lorsque le réservoir est à sa cote maximale d'exploitation (405.08 m). Ces simulations ont été effectuées selon trois coefficients de diffusion de turbulence différents : 0.1 m<sup>2</sup>/s, 0.5 m<sup>2</sup>/s et 1 m<sup>2</sup>/s. La comparaison des niveaux d'eau simulés obtenus est présentée à la Figure 5-19.

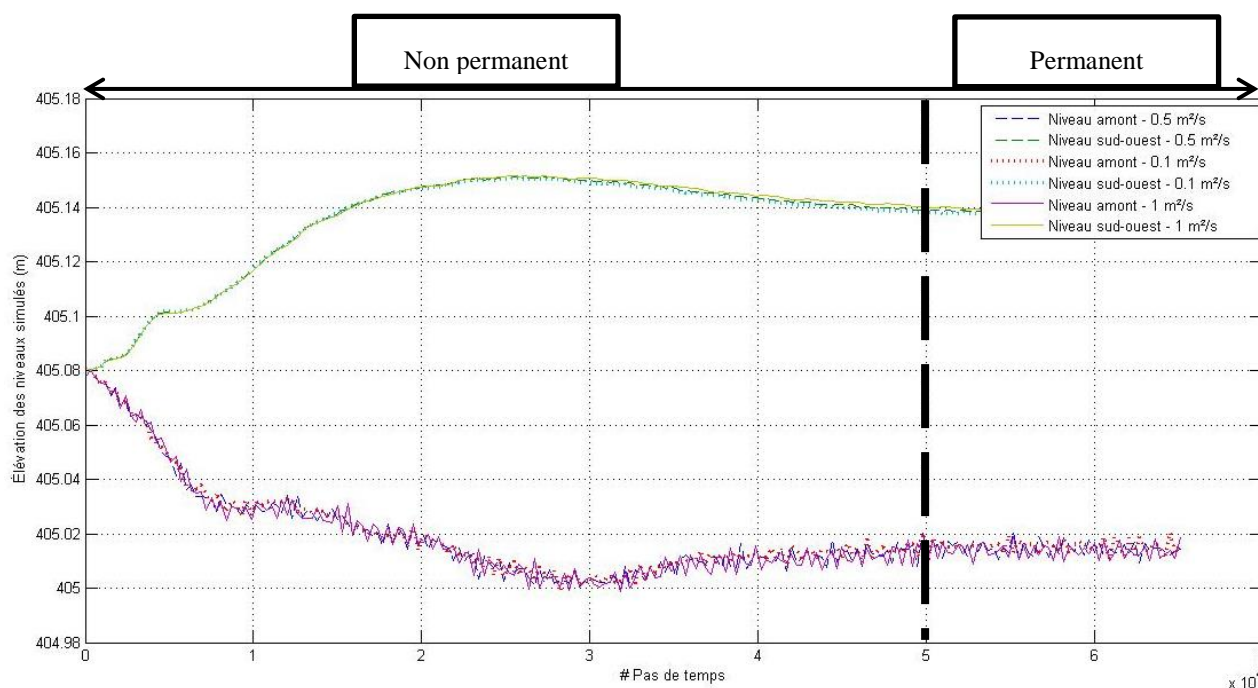


Figure 5-19 Analyse de sensibilité du coefficient de diffusion de la turbulence du modèle de Gouin à un pas de temps d'une seconde

À partir de la figure précédente, il est possible de conclure que contrairement au modèle d'Outardes 4, le coefficient de diffusion de la turbulence n'a aucune influence à l'état non permanent tout comme à l'état permanent. Ce paramètre ne sera donc pas utile lors de la calibration.

#### 5.4.4 Choix du pas de temps

Le pas de temps de calcul du modèle de Gouin a été sélectionné de la même façon que pour le modèle d'Outardes 4 (voir section 5.2.4). Pour les différentes simulations hydrodynamiques qui ont conduit au choix du pas de temps de calcul, la durée de calcul en temps réel et le nombre maximal d'itérations requis par le solveur pour atteindre la convergence sont présentés à la Figure 5-20. On peut voir à cette figure que la limite maximale du pas de temps est de 10 secondes. Au-delà, des problèmes de convergence du solveur surviennent. Il est donc préférable de sélectionner un pas de temps inférieur à cette limite. Conséquemment un pas de

temps de 7.5 secondes a été utilisé pour le modèle de Gouin puisqu'à cette valeur, le solveur numérique est stable, la durée de calcul en temps réel est raisonnable et parce que cette valeur est le plus petit commun multiple inférieur à 10 secondes de l'intervalle de temps minimum entre les mesures à Gouin (intervalle de 5 minutes, voir Tableau 4-5).

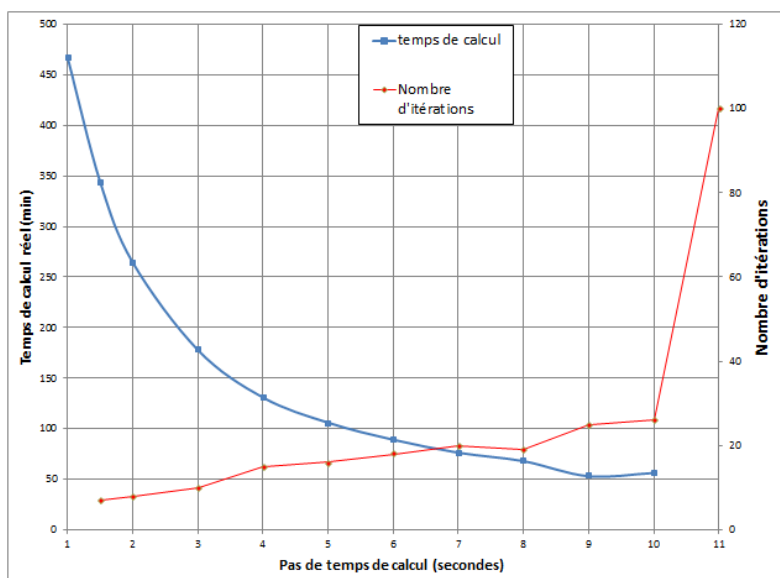


Figure 5-20 Choix du pas temps en fonction du temps de calcul réel et du nombre d'itérations requises par le solveur numérique pour atteindre la convergence – Modèle Gouin à 236 000 nœuds

### 5.4.5 Vérification des courants à l'état permanent causés par un vent constant

Les courants en état permanent près des limnimètres du réservoir Gouin générés par un vent constant de 20 km/h provenant de l'Ouest sont illustrés à la Figure 5-5, à la Figure 5-6 et à la Figure 5-7.

On peut remarquer qu'à l'état permanent, la vitesse des courants varient entre 2 cm/s à 22 cm/s. Par rapport aux directions du courant, on remarque plusieurs zones de recirculations pouvant être causées par la bathymétrie extrêmement complexe du réservoir.

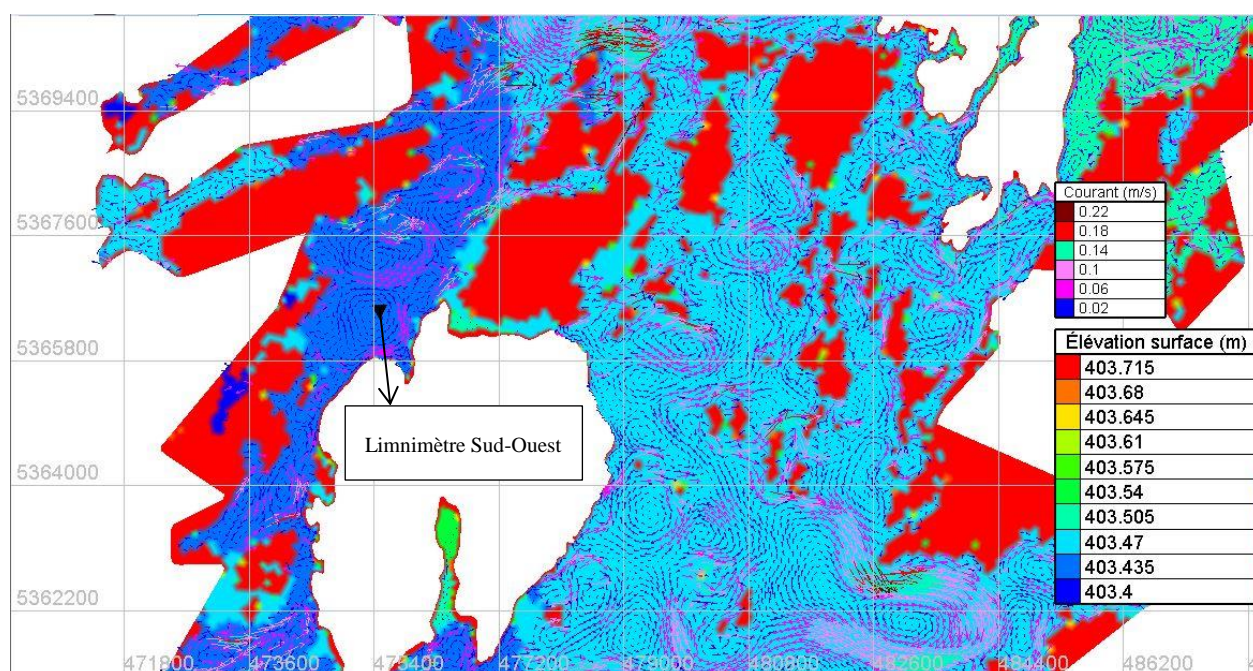


Figure 5-21 Courant en état permanent dans le réservoir Gouin près du limnimètre Sud-Ouest pour un vent constant de 20 km/h provenant de l'Ouest – Système de coordonnées UTM zone 18 avec un datum NAD83

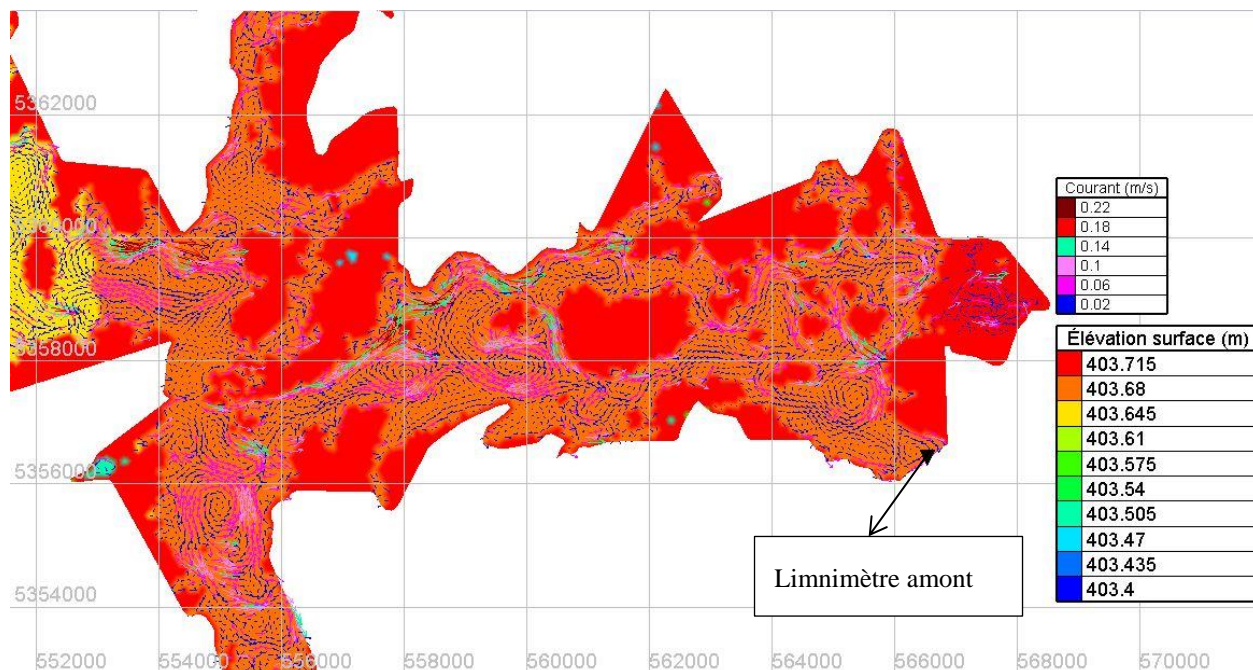


Figure 5-22 Courant en état permanent dans le réservoir Gouin près du limnimètre amont pour un vent constant de 20 km/h provenant de l'Ouest – Système de coordonnées UTM zone 18 avec un datum NAD83

De plus, les vitesses maximales atteintes par les courants durant la phase transitoire sont présentées à la Figure 5-23. Les courants maximaux générés par un vent constant de 20 km/h provenant de l'Ouest peuvent atteindre jusqu'à 87 cm/s.

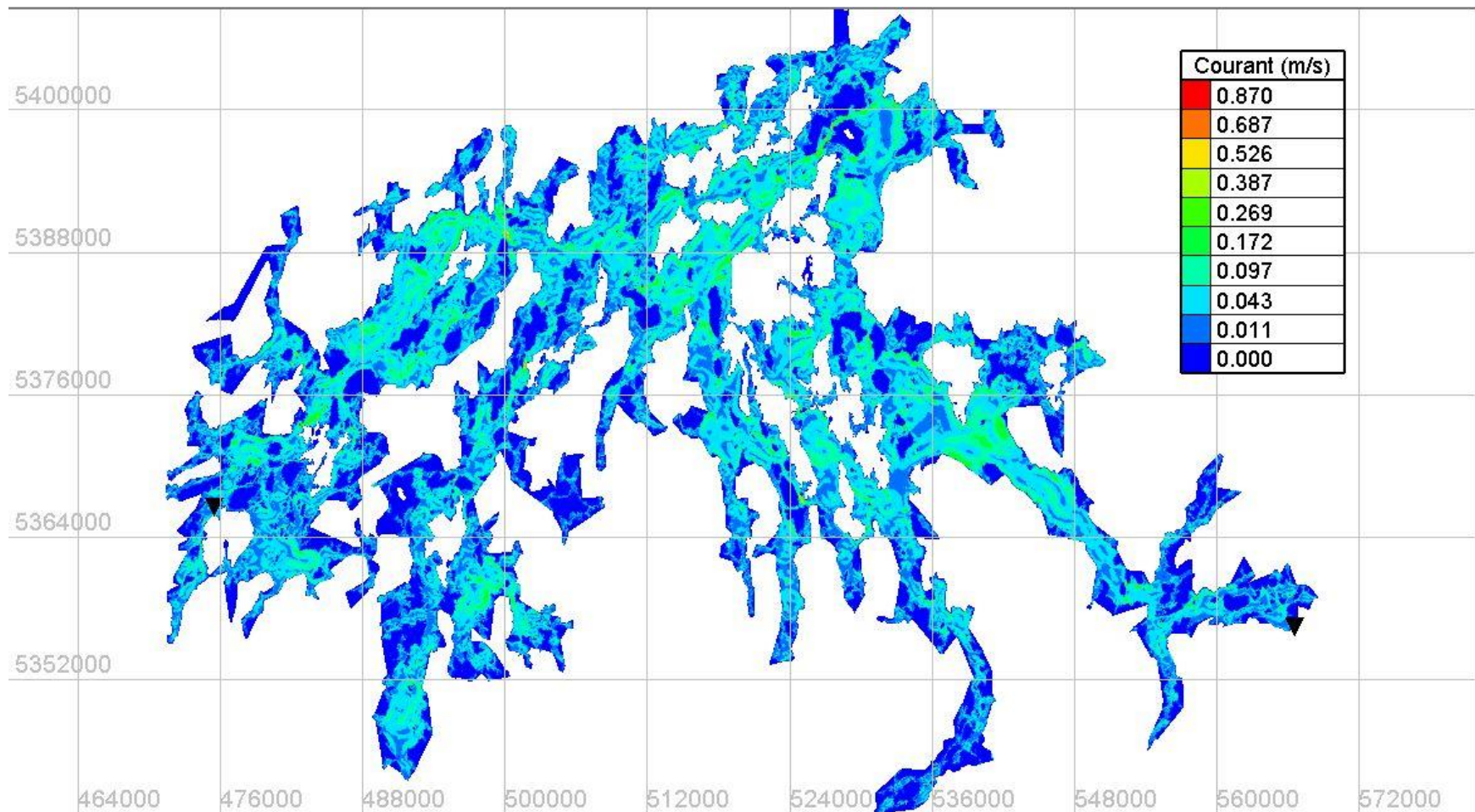


Figure 5-23 Vitesses maximales atteintes par les courants durant la phase transitoire de la simulation pour le réservoir Gouin

Cependant, les courants illustrés aux précédentes suivantes ne proviennent pas d'un modèle calibré. Avant d'utiliser le modèle pour le reste de la démarche, il est nécessaire d'effectuer une calibration.

## **5.4.6 Calibration du modèle**

### **5.4.6.1 Procédure de calibration**

À quelques exceptions près, la calibration du modèle de Gouin suit les mêmes étapes que pour le modèle d'Outardes 4 (voir section 5.2.6.1). Il a été déterminé durant l'analyse de sensibilité du modèle de Gouin que le coefficient de rugosité de Manning est un paramètre important pour la calibration en écoulement non permanent. Dans un premier temps, en fixant le coefficient de traînée du vent selon la formulation de Wu (1980), le coefficient de Manning est ajusté pour améliorer les indicateurs de qualité de la calibration. On remarque après une première phase de calibration que la simulation avec la formulation de Wu (1980) ne permet pas de représenter l'écart type de la variation du niveau combiné ( $\sigma(\Delta N_{c,obs})$ ). Il a donc été décidé de faire varier manuellement le coefficient de traînée du vent pour améliorer la représentativité du modèle par rapport aux observations de niveaux combinés.

### **5.4.6.2 Hypothèses et justifications pour la modélisation**

La majorité des justifications et des hypothèses admises pour la modélisation et la calibration du modèle d'Outardes 4 (voir section 5.2.6.2) sont applicables pour la calibration du modèle de Gouin. Il y a cependant quelques éléments à ajouter ou modifier :

- Le mois de juillet 2012 a été sélectionné pour la procédure de calibration. Ce mois contient des épisodes de forts vents. Les données de ce mois qui seront utilisées pour forcer les simulations de calibration sont présentées à la Figure 5-24.
- Les apports de Gouin sont négligés puisque les apports filtrés de SPAN sont très faibles et parce que la moyenne des apports naturels calculés par bilan hydrique est négative. L'écoulement dans le modèle sera seulement causé par l'effet du vent et la sortie de l'eau à l'aval du modèle (à l'évacuateur de crues).
- La condition initiale est générée par une simulation d'écoulement à état permanent. La condition initiale est obtenue lorsque les résultats de la simulation sont stabilisés et ne

varient plus dans le temps. Il est supposé que la condition initiale est conditionnée au débit déversé du 2012/07/01 introduit par des sources positionnées dans les endroits où la bathymétrie est la plus profonde dans le modèle. Toujours pour la génération de la condition initiale, la condition frontière aval du modèle est imposée au niveau enregistré le 2012/07/01 près de l'évacuateur de crues du réservoir Gouin.

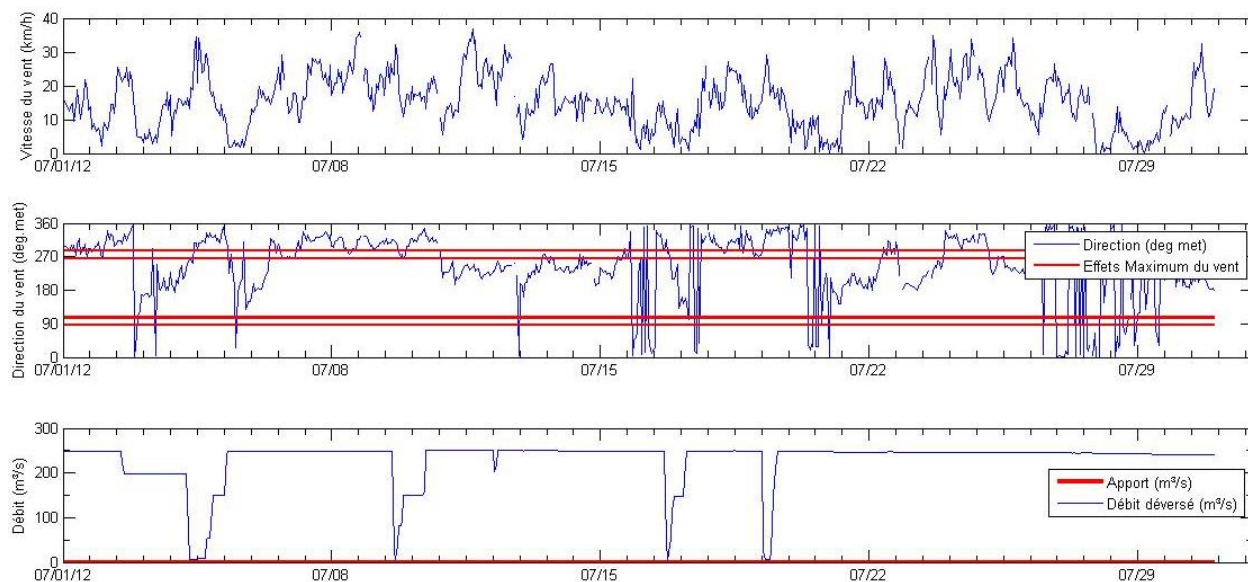


Figure 5-24 Données de forçage du modèle de Gouin pour le mois de juillet 2012 pour les simulations de calibration

#### 5.4.6.3 Vérification des courants de l'état initial

La condition initiale du modèle est obtenue en effectuant une simulation en état permanent. Cette condition initiale est obtenue en imposant un débit de 250 m<sup>3</sup>/s réparti selon différentes sources dans le réservoir ainsi qu'un vent de 15 km/h provenant du Nord-Ouest. Les courants sont illustrés à la Figure 5-25 et à la Figure 5-26. Les courants sont faibles près du limnimètre Sud-Ouest (Figure 5-25). Près de l'évacuateur, on remarque une accélération des courants avec des vitesses qui peuvent aller jusqu'à 5 cm/s. On peut conclure que les courants sont correctement acheminés dans l'ensemble du réservoir.

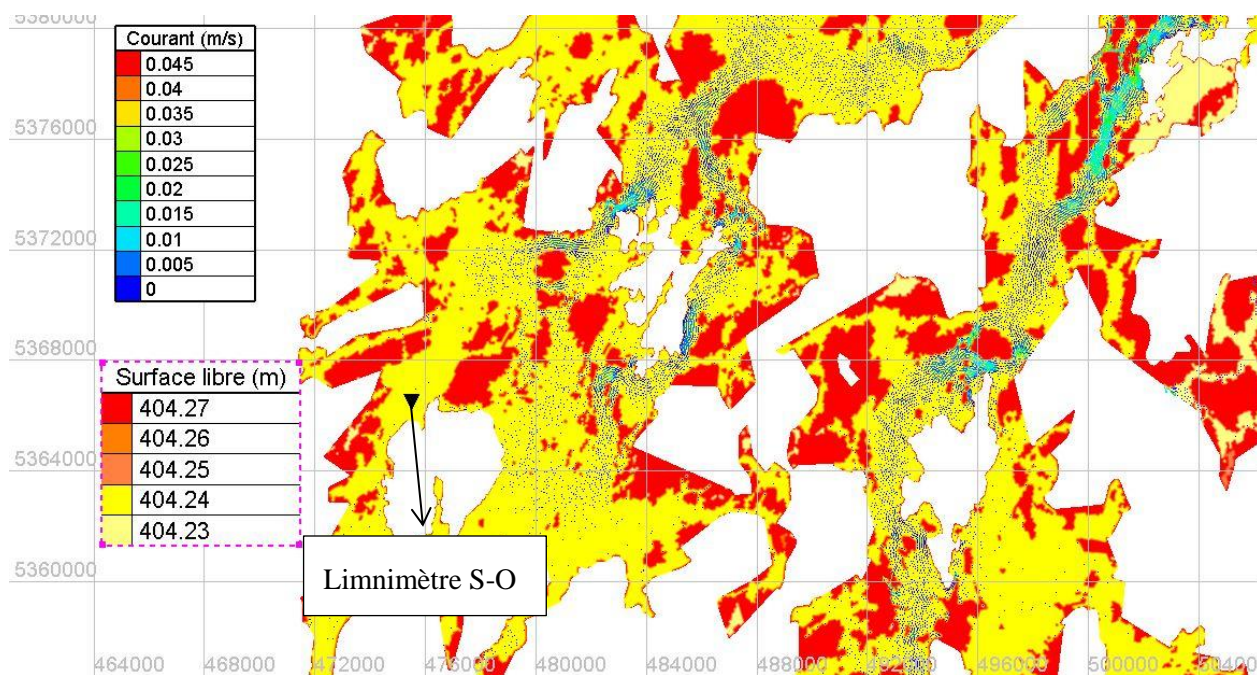


Figure 5-25 Courant de la condition initiale de Gouin près du limnimètre Sud-Ouest – Système de coordonnées UTM zone 18 avec un datum NAD83

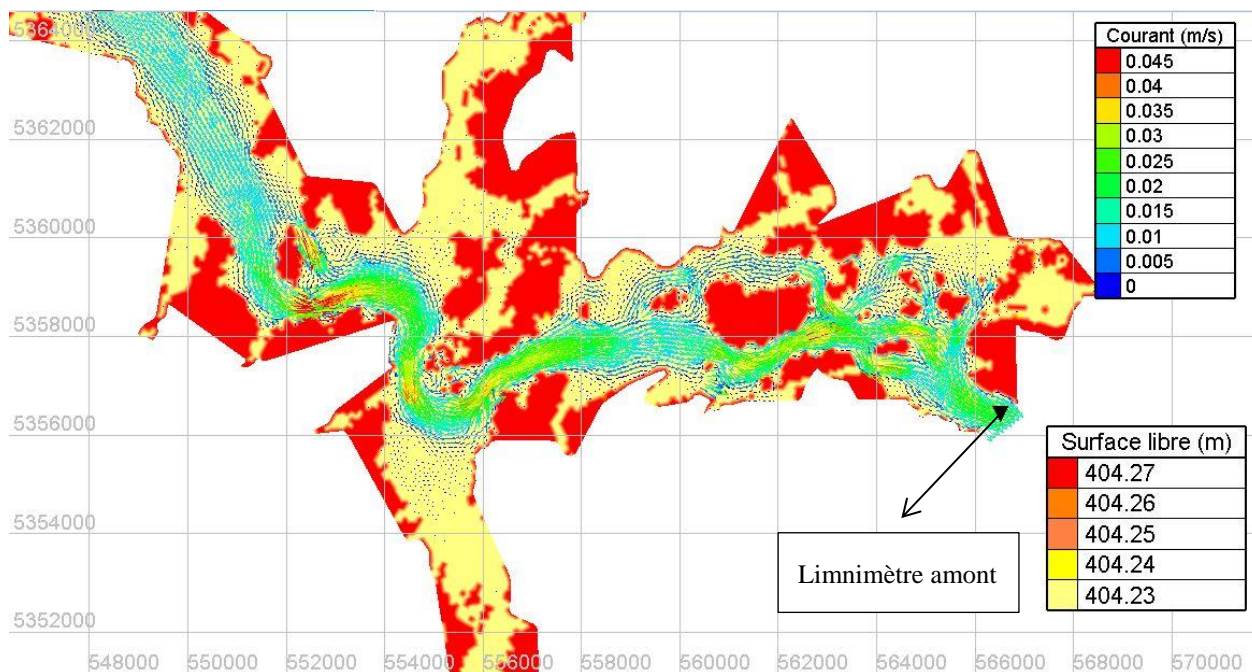


Figure 5-26 Courant de la condition initiale de Gouin près du limnimètre amont – Système de coordonnées UTM zone 18 avec un datum NAD83

#### 5.4.6.4 Résultats de calibration

Tel qu'expliqué dans la procédure de calibration (section 5.4.6.1), la calibration du modèle de Gouin a été effectuée en deux étapes. La première étape a consisté à ajuster le coefficient de Manning pour représenter le niveau combiné observé et l'écart type de la variation du niveau combiné. Les résultats de cette première phase de calibration sont présentés au Tableau 5-2. On peut remarquer à ce tableau que l'utilisation d'un coefficient de Manning de 0.018 a conduit aux meilleurs résultats par rapport aux indicateurs de qualité. On remarque également que pour le même coefficient de friction, la simulation excluant l'effet du vent a moins bien performé que la simulation incluant l'effet du vent.

Tableau 5-2 Résultats des simulations de calibration phase 1 du réservoir Gouin en fonction des indicateurs de performance décrits à la section 5.2.6.1

Sommaire de la calibration - phase 1			Indicateurs de performance		
Type de série	Coefficient de rugosité de Manning (--)	Coefficient de traînée du vent (--)	RMSE $N_{c,sim}$ VS $N_{c,obs}$ (cm) **	$\sigma(\Delta N_c)$ (m)	$\sigma(\Delta N_{c,obs}) - \sigma(\Delta N_{c,sim})$ (m) **
Observée	--	--	--	0.013	--
Simulée	0.013	Variable *	2.47	0.0003	0.0127
<b>Simulée</b>	<b>0.018</b>	<b>Variable *</b>	<b>2.47</b>	<b>0.0003</b>	<b>0.0127</b>
Simulée	0.023	Variable *	2.48	0.0003	0.0127
Simulée	0.028	Variable *	2.49	0.0003	0.0127
Simulée	0.033	Variable *	2.50	0.0003	0.0127
Simulée	0.018	0 ***	2.57	0.0002	0.0128

#### Légende :

\* Coefficient de traînée du vent selon la formulation de Wu (1980), voir Tableau 2-2

\*\* Plus le le score est près de 0, plus la simulation est représentative de la série observée

\*\*\* Simulation sans vent

**Scénario et paramètre retenu**

Cependant, on peut remarquer au Tableau 5-2 qu'aucune simulation (avec ou sans vent) ne parvient à bien représenter l'écart type de la variation du niveau combiné ( $\sigma(\Delta N_{c,obs})$ ). Ceci peut être expliqué par un mauvais fonctionnement des limnimètres durant cette période et/ou par le fait que les vagues de courtes périodes ont été négligées lors des simulations. Afin de pallier à

ce problème, une deuxième phase de calibration a été nécessaire. Durant cette phase de calibration, le coefficient de traînée du vent a été manuellement ajusté pour améliorer les indicateurs de performance des simulations. Les résultats de calibration par ajustement du coefficient de traînée du vent sont présentés au Tableau 5-3. On peut remarquer à ce tableau que pour des caractéristiques de vent enregistrées selon un intervalle horaire, la simulation avec un coefficient de traînée du vent de  $3.7 \times 10^{-3}$  a produit les meilleurs résultats. La meilleure simulation de calibration ( $C_D = 3.7 \times 10^{-3}$  et  $n = 0.018$ ) est comparée à la simulation sans vent et aux séries observées à la Figure 5-27.

Tableau 5-3 Résultats des simulations de calibration phase 2 du réservoir Gouin en fonction des indicateurs de performance décrits à la section 5.2.6.1

Sommaire de la calibration - phase 2			Indicateurs de performance		
Type de série	Coefficient de rugosité de Manning (--)	Coefficient de traînée du vent (--)	RMSE $N_{c,sim}$ VS $N_{c,obs}$ (cm) **	$\sigma (\Delta N_c)$ (m)	$\sigma(\Delta N_{c,obs}) - \sigma(\Delta N_{c,sim})$ (m) **
Observée	--	--	--	0.013	--
Simulée	0.018	$1.8 \times 10^{-3}$	2.42	0.0004	0.0126
Simulée	0.018	$2.2 \times 10^{-3}$	2.45	0.0004	0.0126
Simulée	0.018	$2.5 \times 10^{-3}$	2.44	0.0005	0.0125
Simulée	0.018	$2.8 \times 10^{-3}$	2.45	0.0005	0.0125
Simulée	0.018	$3.1 \times 10^{-3}$	2.44	0.0005	0.0125
Simulée	0.018	$3.4 \times 10^{-3}$	2.44	0.0006	0.0124
<b>Simulée</b>	<b>0.018</b>	<b><math>3.7 \times 10^{-3}</math></b>	<b>2.44</b>	<b>0.0006</b>	<b>0.0124</b>
Simulée	0.018	$4.0 \times 10^{-3}$	2.5	0.0006	0.0124
Simulée	0.018	$4.5 \times 10^{-3}$	2.52	0.0007	0.0123
Simulée	0.018	0 ***	2.57	0.0002	0.0128

**Légende :**

\*\* Plus le score est près de 0, plus la simulation est représentative de la série observée

\*\*\* Simulation sans vent

**Scénario et paramètre retenu**

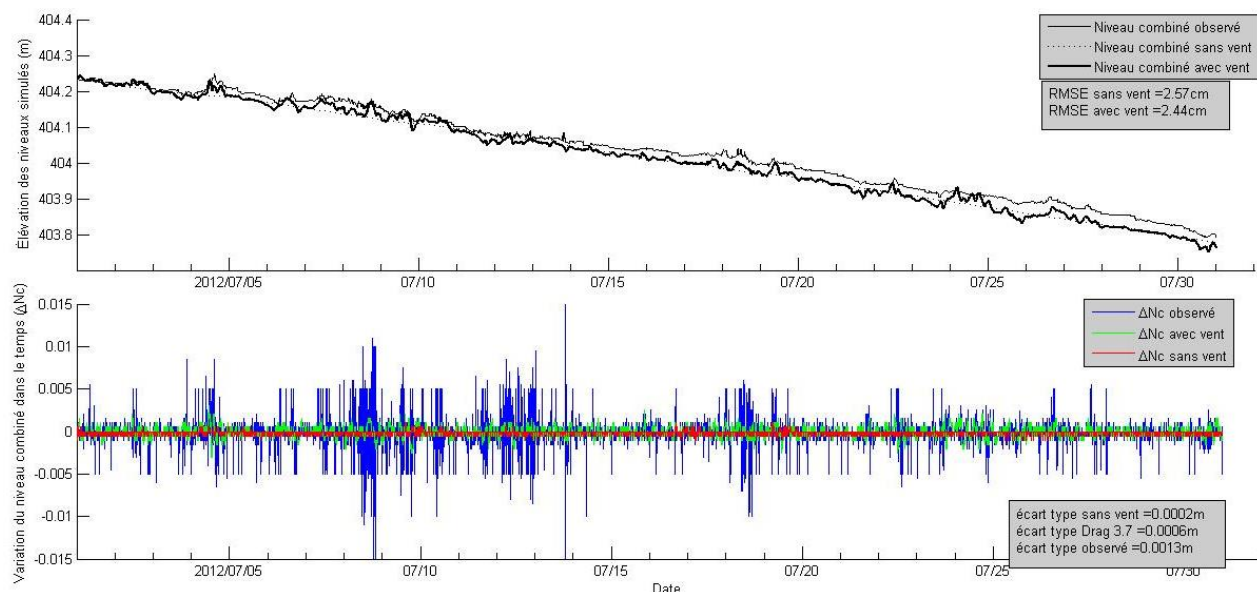


Figure 5-27 Simulation de calibration de Gouin pour la période de 2012/07/01 à 2012/07/31

## 5.5 Simulation en système fermé de Gouin

La simulation illustrée à la Figure 5-27 incluant l'effet du vent avec un coefficient de Manning de 0.018 et un coefficient de traînée du vent de  $3.7 \cdot 10^{-3}$  est relancé, mais cette fois en système fermé. Il n'y a donc aucune sortie d'eau. Seul l'effet du vent agit sur le modèle. À partir des niveaux simulés obtenus, l'équation de bilan hydrique (voir les équations (2.3), (2.4) et (2.5)) avec pondération arithmétique est utilisée pour estimer l'incertitude de l'effet du vent à Gouin. Puisqu'il y a conservation du volume en condition de système fermé, seulement le terme  $\Delta S$  est calculé. Le calcul de  $\Delta S$  en système fermé à partir des niveaux simulés permet d'obtenir l'erreur d'apport à Gouin durant le mois de juillet 2012 tel qu'indiqué à la Figure 5-28.

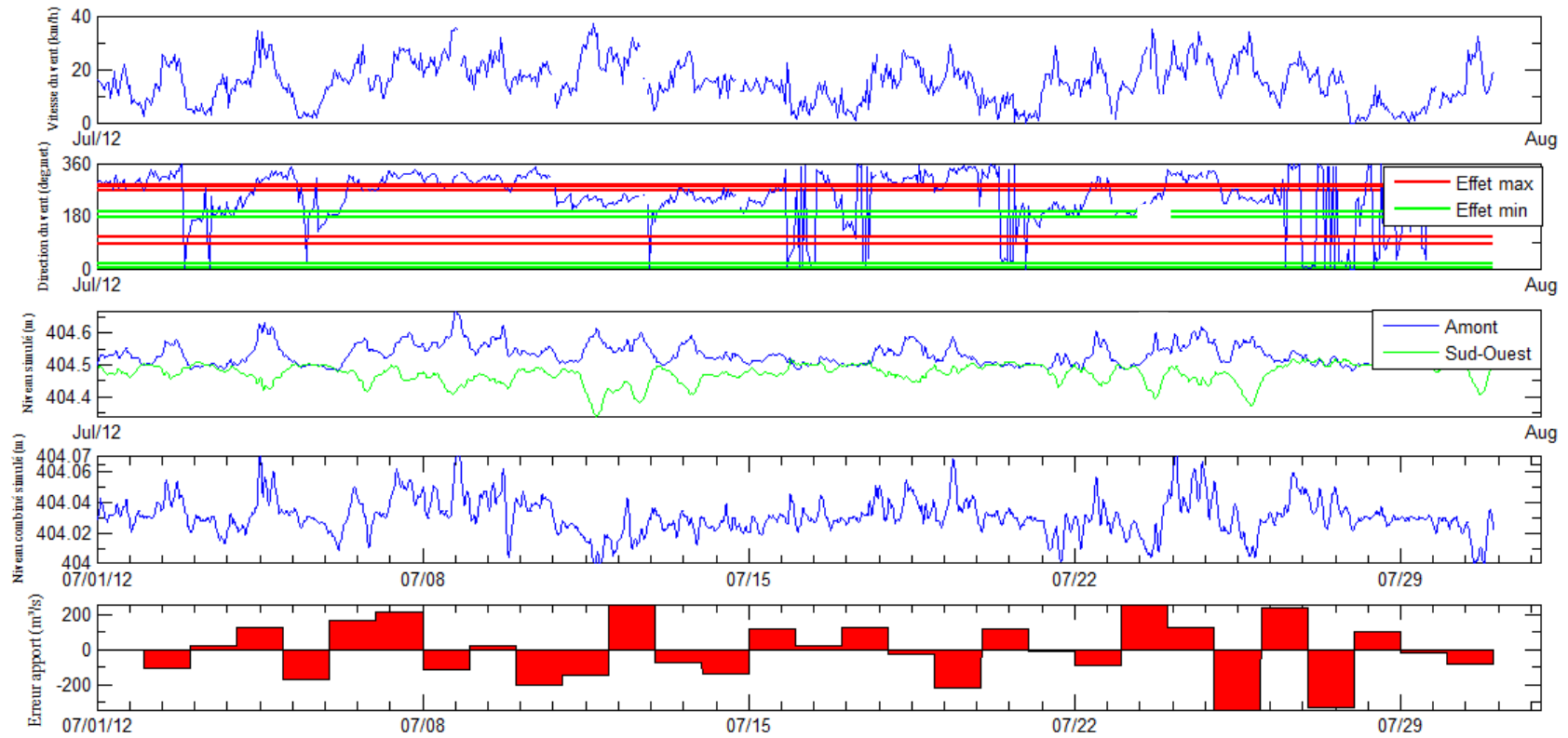


Figure 5-28 Estimation par simulation en système fermé de l'incertitude de l'apport naturel due à l'effet du vent pour le mois de juillet 2012 à Gouin

Contrairement à Outardes 4, l'effet du vent sur le réservoir Gouin a un impact extrêmement important sur le calcul d'apport par bilan hydrique. L'erreur maximale estimée par la simulation en système fermé du mois de juillet 2012 est de l'ordre de 340 m<sup>3</sup>/s. Ce mois a été sélectionné puisqu'il présentait des épisodes de vent frôlant les 30 km/h orientés dans l'axe reliant les limnimètres. Tel qu'indiqué à la Figure 5-28, l'erreur due au vent dans le calcul d'apport par bilan hydrique survient tous les jours de la simulation peu importe la vitesse ou la direction du vent. On peut donc s'attendre à une incertitude importante et continue sur toute la durée des données historiques. Finalement, comme à Outardes 4, il ne semble pas y avoir de lien entre le signe de l'erreur d'apport (+ ou -) et la direction du vent. Ceci peut-être causé par les forces inertielles qui agissent sur le plan d'eau lorsque la vitesse de vent ou sa direction varie brusquement. Le cas échéant, un mouvement oscillatoire du plan d'eau est déclenché jusqu'au retour à l'équilibre. Dépendamment de la durée de retour à l'équilibre, les forces inertielles peuvent ajouter une erreur additionnelle dans le calcul d'apport par bilan hydrique.

## 5.6 Conclusions et recommandations

Ce chapitre avait pour objectif de préparer des modèles hydrodynamiques des réservoirs Outardes 4 et Gouin afin d'effectuer des simulations en système fermé en incluant seulement l'effet du vent. À cette fin, TELEMAC-2D a été utilisé comme un outil permettant d'évaluer et d'estimer l'incertitude du vent induite dans l'équation du bilan hydrique en condition d'écoulement non permanent. La démarche effectuée au cours de ce chapitre permet d'établir les conclusions/recommandations suivantes :

- L'analyse de sensibilité effectuée sur le modèle d'Outardes 4 permet de constater que le coefficient de diffusion de turbulence a un impact significatif sur les résultats des simulations. Le coefficient de rugosité avait quant à lui un impact négligeable.
- L'analyse de sensibilité effectuée sur le modèle de Gouin permet de constater que le coefficient de Manning a un impact modéré sur les résultats des simulations. Le coefficient de diffusion de la turbulence avait quant à lui un impact négligeable.
- L'analyse de sensibilité effectuée sur le modèle de Gouin permet également de constater que pour la même vitesse et la même direction de vent, la dénivellation due au vent du

plan d'eau est complètement différente dépendamment du niveau d'exploitation initial choisi.

- La meilleure simulation en écoulement non permanent du réservoir Outardes 4 a été obtenue en utilisant un coefficient de diffusion de la turbulence de  $5 \text{ m}^2/\text{s}$  avec un coefficient de traînée du vent suivant la formulation de Wu (1980). Les valeurs utilisées pour ces deux paramètres permettent de simuler de façon raisonnable le niveau combiné observé durant le mois d'octobre 2010.
- La meilleure simulation en écoulement non permanent du réservoir Gouin a été obtenue en utilisant un coefficient de Manning de  $0.018 \text{ m}^2/\text{s}$  avec un coefficient de traînée du vent de  $3.7 \cdot 10^{-3}$ . Les valeurs utilisées pour ces deux paramètres permettent de simuler de façon raisonnable le niveau combiné observé durant le mois de juillet 2012.
- La simulation en système fermé du réservoir Outardes 4 permet d'estimer que l'incertitude maximale du vent introduite dans l'équation de bilan hydrique est de l'ordre de  $21 \text{ m}^3/\text{s}$  durant le mois d'octobre 2010.
- La simulation en système fermé du réservoir Gouin permet d'estimer que l'incertitude maximale du vent introduite dans l'équation de bilan hydrique est de l'ordre de  $340 \text{ m}^3/\text{s}$  durant le mois de juillet 2012.

Ce chapitre a permis de démontrer qu'il serait possible d'utiliser la modélisation hydrodynamique 2D en temps réel afin d'estimer l'incertitude journalière du vent introduite dans l'équation de bilan hydrique. Un des avantages des modèles hydrodynamiques en écoulement non permanent par rapport aux modèles à état permanent est qu'ils permettent de considérer l'inertie du plan d'eau. Toutefois, l'effort requis pour la préparation et la simulation de ces modèles est non négligeable. De plus, il serait pratiquement infaisable pour Hydro-Québec d'élaborer un modèle pour chacun de ses réservoirs et de les utiliser simultanément en temps réel pour évaluer l'erreur de vent dans le bilan hydrique de chaque réservoir. Il devient alors pertinent d'envisager d'utiliser les modèles à état permanent dans l'optique d'élaborer une méthodologie de correction des effets de vent applicable à l'ensemble du parc hydroélectrique d'Hydro-Québec.

## **CHAPITRE 6    MODÉLISATION DE L'EFFET DU VENT EN ÉCOULEMENT PERMANENT**

### **6.1 Introduction**

L'hypothèse d'écoulement permanent consiste à supposer que les caractéristiques de l'écoulement (profondeur d'eau et vitesse du fluide) sont stabilisées et ne varient plus dans le temps. Dans le cadre de ce rapport, cette hypothèse consiste à supposer que le plan d'eau est instantanément débalancé en fonction de la vitesse et de la direction du vent. Le désavantage principal relié à cette hypothèse est que l'inertie du plan d'eau ne peut être considérée (seiches et forces inertielles). Toutefois, son avantage est que la modélisation et la simulation de la dénivellation due au vent n'ont pas besoin d'être effectuées en temps réel comme c'est le cas pour la modélisation en écoulement non permanent. En fait, la modélisation en état permanent de la dénivellation due au vent n'a besoin que d'être effectuée une seule fois dans la mesure où elle couvre toute les conditions et caractéristiques du vent qui peuvent être observées au site à l'étude. Ce type de modélisation pourrait donc être plus facilement utilisé pour être implanté dans une procédure de correction en temps réel des effets de vent de l'équation du bilan hydrique.

Au cours de ce chapitre, différentes méthodes de modélisation de l'effet du vent en écoulement permanent seront expérimentées et comparées. Tout d'abord, la modélisation hydrodynamique sera utilisée en état permanent à partir du modèle de Gouin élaboré au chapitre précédent. Ensuite, la régression non paramétrique sera utilisée à une et à deux variables explicatives pour simuler les différences de niveaux et les réponses aux limnimètres soumis à l'effet du vent. Les méthodes seront comparées entre elles. La méthode la plus appropriée et la plus performante sera réutilisée dans une méthodologie de correction des effets de vent en temps réel qui sera présentée au chapitre 7.

### **6.2 Modélisation hydrodynamique en écoulement permanent**

Le but de cette section est de comparer l'estimation de l'incertitude du vent dans les apports en simulation d'écoulement non permanent (voir chapitre 4) avec une estimation d'incertitude calculée en supposant un effet du vent en écoulement permanent. Puisque l'incertitude maximale causée par le vent à Gouin atteint jusqu'à 340 m<sup>3</sup>/s, le modèle de Gouin

élaboré au chapitre 4 sera réétudié en effectuant différentes simulations en état permanent pour couvrir toutes les conditions et caractéristiques du vent qui peuvent être observées à ce réservoir selon différents niveaux d'exploitation.

### 6.2.1 Hypothèses de modélisation

#### 1. Effets du vent variables selon le niveau d'exploitation :

Tel qu'il a été déterminé durant l'analyse de sensibilité du réservoir Gouin (voir section 5.4.1), le niveau d'exploitation du réservoir semble avoir une importance particulière sur la simulation de la dénivellation due au vent. Il est admis qu'il est possible d'améliorer la performance de modélisation de l'effet du vent en introduisant le niveau d'exploitation comme variable. Cette hypothèse est représentée physiquement à la Figure 6-1 et son effet bénéfique escompté pour la modélisation des différences de niveaux est présenté à la Figure 6-2.

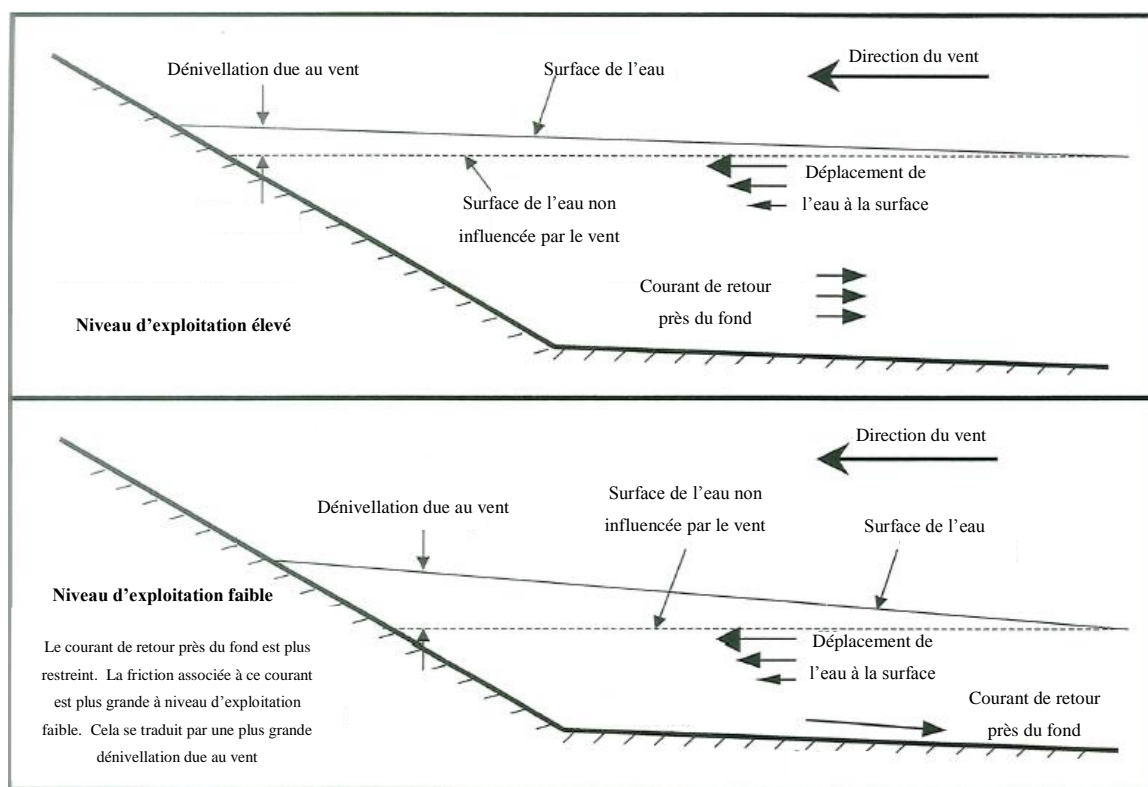


Figure 6-1 Explication de l'hypothèse pour laquelle la modélisation de l'effet de vent peut être améliorée en considérant le niveau d'exploitation – Adapté de (Baird & Associates, 2000)

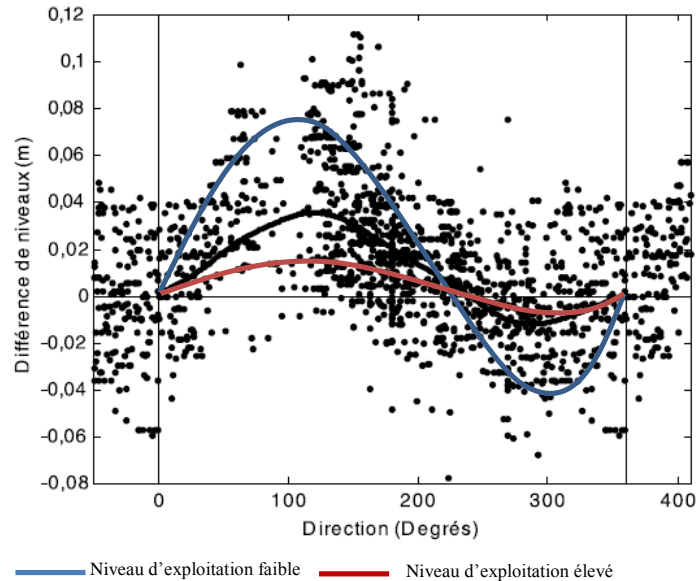


Figure 6-2 Effet bénéfique escompté pour la performance de la modélisation de l'effet du vent sur les réservoirs lorsque le niveau d'exploitation est considéré dans la modélisation

Tel qu'illustré à la Figure 6-1, le vent induit un courant de surface dans le réservoir. Lorsque ce courant atteint une rive, un courant de retour au fond du réservoir est généré. Lorsque le niveau du réservoir est faible, le courant de retour est freiné par le courant de surface qui a une trajectoire inverse et par la rugosité du fond du réservoir. Par conséquent, il y a plus d'eau qui s'accumule près de la rive, donc une dénivellation due au vent plus grande. En introduisant le niveau d'exploitation dans la modélisation, on s'attend à améliorer la représentativité du modèle tel qu'illustré à la Figure 6-2. Plusieurs relations de différences de niveau provenant d'un niveau d'exploitation variables devraient être plus représentatif des observations par rapport à une seule relation de différences de niveau pour représenter tout l'échantillon.

## 2. Sélection des données de vent et de niveaux observés

Seulement les données entre le mois de mai et le mois d'octobre ont été retenues étant donné la possibilité d'une interaction avec un couvert de glace à l'extérieur de cette plage.

## **6.2.2 Calibration du modèle de Gouin en écoulement permanent**

### **6.2.2.1 Procédure de calibration**

Selon l'analyse de sensibilité effectuée pour le modèle de Gouin (voir section 5.4), le coefficient de traînée du vent est le seul paramètre à avoir une influence sur la simulation des niveaux d'eau en état permanent. La calibration du modèle de Gouin en mode permanent sera donc effectuée en recherchant un coefficient de traînée optimal pour différentes classes de vitesses et direction du vent. La performance des simulations de calibration sera évaluée en calculant la racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) des différences de niveaux simulés par rapport aux différences de niveaux observés. Les différences de niveaux entre les limnimètres sont calculées selon la formulation fournie par l'équation (2.15). Toutefois, la formulation des différences de niveaux contient une partie du phénomène que l'on veut observer (effet du vent sur les différences de niveaux) et une partie d'écoulement de l'eau dans le réservoir qui n'est pas causée par l'effet du vent. Afin d'utiliser la formulation des différences de niveaux comme indicateur de performance de modélisation en écoulement permanent, il est nécessaire d'y retirer l'effet de l'écoulement de l'eau (Haché et al., 2003). Afin d'effectuer cette étape, les différences de niveaux observées sont moyennées sur une fenêtre mobile de 15 jours. Le signal moyenné correspond aux différences de niveaux sans l'effet du vent. Les différences de niveaux observées sont ensuite soustraites au signal moyenné pour obtenir les différences de niveaux observés seulement influencés par le vent. La procédure pour obtenir la série observée de référence pour la calibration est illustrée à la Figure 6-3.

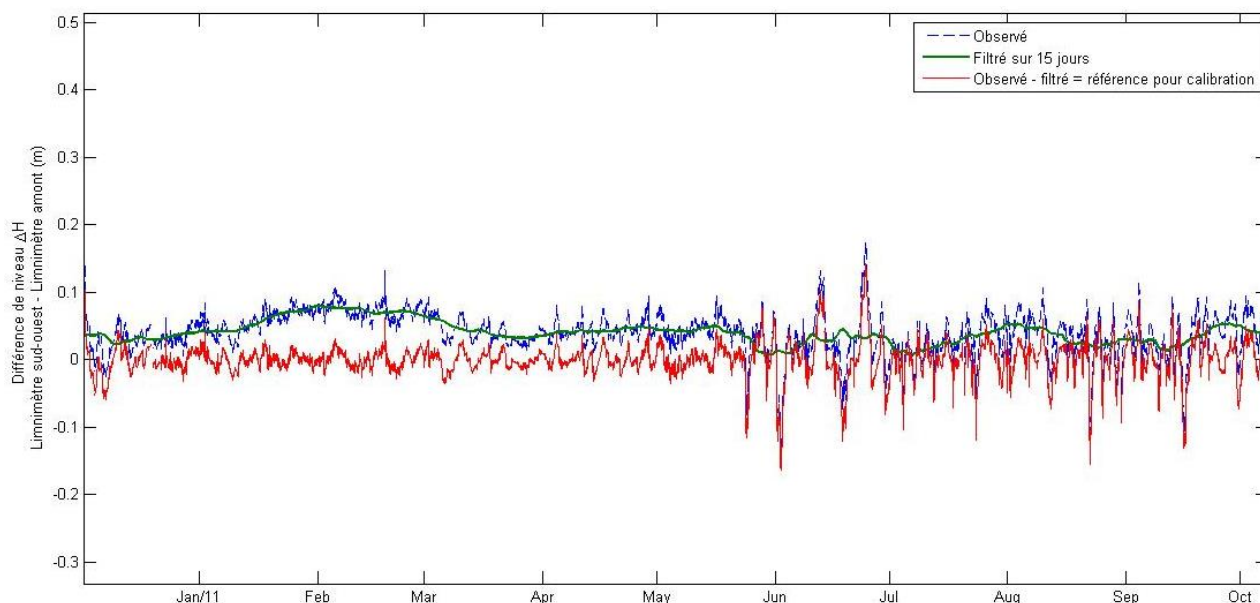


Figure 6-3 Procédure pour rendre les différences de niveaux observées en système fermé sans écoulement d'eau

Une fois la série de référence obtenue, des simulations de calibration peuvent être effectuées. Une simulation consiste à forcer le modèle avec un vent constant et uniforme et d'extraire le résultat du dernier pas de temps lorsque les niveaux simulés sont stabilisés et ne varient plus dans le temps (état permanent). Une série de simulation est lancée afin de couvrir des vitesses de vent de 5 km/h à 30 km/h selon 4 directions;  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $270^\circ$  et selon 7 niveaux d'exploitation différents : 400 m, 400.85 m, 401.69 m, 402.54 m, 403.39 m, 404.23 m, 405.08 m. Autant de séries de simulations sont nécessaires afin couvrir chacun des coefficients des traînées suivants :  $0.5 \cdot 10^{-3}$ ,  $0.7 \cdot 10^{-3}$ ,  $1.0 \cdot 10^{-3}$ ,  $1.2 \cdot 10^{-3}$ ,  $1.4 \cdot 10^{-3}$ ,  $1.8 \cdot 10^{-3}$ ,  $2.7 \cdot 10^{-3}$ ,  $3.7 \cdot 10^{-3}$ ,  $4.7 \cdot 10^{-3}$  et  $5.7 \cdot 10^{-3}$  et  $6.7 \cdot 10^{-3}$ . Au total, 1848 simulations ( $11 C_D \times 7$  niveaux d'exploitation  $\times 6$  vitesses  $\times 4$  directions) ont été lancées pour effectuer la calibration du modèle de Gouin en écoulement permanent. Puisque la variable de direction a été discrétisée à chaque  $90^\circ$ , afin d'obtenir un résultat pour chaque direction, la composition trigonométrique suivante est utilisée (Croley, 1987) :

Si  $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$

$$\Delta H_{sim,\theta} = \Delta H_{sim,90^\circ} \sin\theta + \Delta H_{sim,0^\circ} \cos\theta \quad (6.1)$$

Si  $90 < \theta \leq 180^\circ$

$$\Delta H_{sim,\theta} = \Delta H_{sim,90^\circ} \sin\theta + \Delta H_{sim,180^\circ} \cos\theta \quad (6.2)$$

Si  $180 < \theta \leq 270^\circ$

$$\Delta H_{sim,\theta} = \Delta H_{sim,270^\circ} \sin\theta + \Delta H_{sim,180^\circ} \cos\theta \quad (6.3)$$

Si  $270 < \theta \leq 360^\circ$

$$\Delta H_{sim,\theta} = \Delta H_{sim,270^\circ} \sin\theta + \Delta H_{sim,0^\circ} \cos\theta \quad (6.4)$$

Où

- $\theta$  est la direction du vent
- $\Delta H_{sim,\theta}$  est la différence de niveau simulée entre les limnimètres Sud-ouest et amont du réservoir Gouin sous l'influence d'un vent orienté dans la direction  $\theta$

Tout comme pour la direction du vent, la vitesse et le niveau d'exploitation ont également été discrétisés à un intervalle spécifique. Afin d'obtenir un résultat pour chaque vitesse et niveau d'exploitation observé, une interpolation linéaire tridimensionnelle est effectuée entre les différences de niveaux simulées aux intervalles spécifiques. Un extrait des résultats des simulations de calibration avec un coefficient de traînée égal à  $1.0 \cdot 10^{-3}$  en considérant une élévation initiale du plan d'eau fixe égale à 403.63 m est présenté au Tableau 6-1. Le reste des résultats de calibration sont présentés à l'annexe 1

Tableau 6-1 Extrait des résultats des simulations de calibration en écoulement permanent du réservoir Gouin – RMSE entre les différences de niveaux simulés et observés en fonction de la direction et de la vitesse du vent pour un coefficient de traînée égal à  $1.0 \cdot 10^{-3}$  selon une élévation d'eau initiale de 403.63 m (moyenne de l'historique)

Coefficient de traînée (--)	Vitesse du vent (km/h)	Direction (deg.met)	RMSE/Direction (cm)	RMSE/Direction M0 * (cm)	RMSE/Vitesse (cm)	RMSE/Vitesse M0 * (cm)	RMSE/Traînée (cm)	RMSE M0 * (cm)
1 x 10-3	5	0-90	2.53	2.73	2.57	2.68	<u>3.26</u>	3.86
		90-180	2.97	3.17				
		180-270	2.21	2.13				
		270-360	2.08	2.06				
	10	0-90	2.90	3.32	3.09	3.33		
		90-180	4.00	4.40				
		180-270	2.58	2.51				
		270-360	2.45	2.66				
	15	0-90	3.15	3.91	3.24	3.61		
		90-180	4.89	5.58				
		180-270	2.90	2.76				
		270-360	2.75	3.44				
	20	0-90	3.29	4.19	<u>3.39</u>	4.14		
		90-180	5.31	6.38				
		180-270	3.14	3.08				
		270-360	3.40	4.72				
	25	0-90	3.74	4.84	<u>3.78</u>	5.02		
		90-180	4.10	4.45				
		180-270	3.76	3.59				
		270-360	3.80	5.95				
	30	0-90	3.89	5.04	<u>4.51</u>	6.42		
		90-180	6.35	6.96				
		180-270	4.55	4.46				
		270-360	4.56	7.81				

**Légende :**

\* M0 = Modèle nul, sans vent

**Meilleur score au RMSE parmi tous les coefficients de traînée utilisés**

On peut remarquer au Tableau 6-1 qu'à un niveau d'exploitation fixe (403.63 m), un coefficient de traînée de  $1.0 \cdot 10^{-3}$  donne les meilleurs résultats avec un score de 3.26 cm au RMSE des différences de niveaux pour l'ensemble des simulations.

Puisque les simulations de calibration ont été effectuées selon 7 niveaux d'exploitation différents, au lieu d'interpoler tous les résultats selon le niveau d'exploitation moyen historique (403.63 m), il est possible d'interpoler les résultats selon chaque niveau combiné de l'historique des données. En effectuant cette interpolation tridimensionnelle, il est donc possible d'inclure un niveau d'exploitation variable dans la modélisation. Les RMSE obtenus selon une modélisation par niveau d'exploitation fixe sont comparés à une modélisation par niveau d'exploitation variable pour un coefficient de traînée du vent de  $1.0 \cdot 10^{-3}$  au Tableau 6-2.

Tableau 6-2 Comparaison du RMSE d'une modélisation à niveau d'exploitation fixe par rapport à une modélisation à niveau d'exploitation variable

Coefficient de traînée (--)	1 x 10 <sup>-3</sup>					
Vitesse du vent (km/h)	5	10	15	20	25	30
RMSE en profondeur variable (cm)	<u>2.56</u>	<u>3.09</u>	<u>3.23</u>	<u>3.38</u>	<u>3.76</u>	<u>4.48</u>
RMSE en profondeur fixe (cm)	2.57	3.09	3.24	3.39	3.78	4.51

On peut donc voir au Tableau 6-2 que le fait de considérer un niveau d'exploitation variable dans la modélisation améliore de façon modérée la performance des simulations.

#### 6.2.2.2 Estimation de l'incertitude d'apport naturel journalier

À partir d'un coefficient de traînée du vent de  $1.0 \times 10^{-3}$ , il est possible d'effectuer des simulations à état permanent représentatives des conditions de vent maximales observées au réservoir Gouin pour le même mois de juillet 2012 qui a été étudié au Chapitre 5. Les simulations sont effectuées en système fermé : conditions frontières sèches pour tout le domaine. Lorsque les résultats sont stabilisés dans le temps, les niveaux simulés sont ensuite utilisés dans le calcul du bilan hydrique afin d'estimer l'incertitude de l'apport naturel causée par l'effet du vent. Les résultats de ces simulations sont présentés au Tableau 6-3.

Tableau 6-3 Calcul de l'incertitude d'apport naturel journalier causée par l'effet du vent en considérant un écoulement permanent

Vitesse du vent (km/h) *	Direction (deg.met)	Niveau initial (m)	Limnimètre Sud-ouest simulé (m)	Limnimètre amont simulé (m)	Différence de niveaux simulée (cm) **	Réponse Sud-ouest simulée (cm) ***	Réponse amont simulée (cm) ***	Réponse combinée simulée (cm)	Variation de volume (hm <sup>3</sup> ) ****	Incertitudes apport journalier (m <sup>3</sup> /s)
26	0	404.500	404.506	404.507	-0.1	0.6	0.7	0.65	11	124
26	45	404.500	404.523	404.485	3.8	2.3	-1.5	0.4	7	76
26	90	404.500	404.529	404.471	5.8	2.9	-2.9	0	0	0
26	135	404.500	404.516	404.474	4.2	1.6	-2.6	-0.5	-8	-96
26	180	404.500	404.494	404.492	0.2	-0.6	-0.8	-0.7	-12	-134
26	225	404.500	404.476	404.515	-3.9	-2.4	1.5	-0.45	-7	-86
26	270	404.500	404.473	404.528	-5.5	-2.7	2.8	0.05	1	10
26	315	404.500	404.485	404.526	-4.1	-1.5	2.6	0.55	9	105

**Légende :**

\* Vitesse moyenne journalière maximale du mois de juillet 2012 au réservoir Gouin

\*\*  $\Delta H_{AB,sim} = L_{sud-ouest,sim} - L_{amont,sim}$

\*\*\*  $R_{A,t,sim} = L_{A,t,sim} - L_{A,t-1,sim}$

\*\*\*\* Calculé à partir de la courbe d'emmagasinement officielle

On peut observer au Tableau 6-3 que l'incertitude maximale de l'apport naturel en supposant un écoulement permanent est de l'ordre de  $134 \text{ m}^3/\text{s}$  ce qui est moins de la moitié de celle qui a été déterminée pour un écoulement non permanent ( $340 \text{ m}^3/\text{s}$ , voir Chapitre 5). La supposition d'un écoulement permanent peut donc entraîner une sous-estimation majeure de l'incertitude de l'apport naturel causée par l'effet du vent. Cette sous-estimation peut être expliquée par le fait que les seiches et l'effet temporel du vent sont négligés en écoulement permanent. De plus, la démarche de calibration du modèle a été effectuée avec tout l'échantillon de données de différence de niveaux. En effectuant la calibration sur les valeurs extrêmes de l'échantillon, l'écart entre l'incertitude estimée à l'état permanent et à l'état non permanent aurait pu être réduit.

Il est également important de souligner que l'erreur maximale ( $-134 \text{ m}^3/\text{s}$ ) survient à une direction de 180 degrés pour laquelle la différence de niveau simulée entre les limnimètres est à son minimum. À cette direction, les deux instruments enregistrent des variations qui vont dans le même sens ( $-0.6 \text{ cm}$  et  $-0.8 \text{ cm}$ ). La différence de niveau est donc très faible ( $0.2 \text{ cm}$ ), mais la réponse combinée est élevée ( $-0.7 \text{ cm}$ ) ce qui donne une incertitude de  $-134 \text{ m}^3/\text{s}$ . À la lumière de ces constatations, on peut conclure que la formulation des différences de niveau n'est pas la plus appropriée pour étudier l'effet du vent sur l'incertitude de l'apport naturel calculé par bilan hydrique. Il est préférable d'étudier les réponses dues au vent individuellement pour chaque instrument.

Les résultats du Tableau 6-3 sont illustrés sous forme de schémas de la Figure 6-4 à la Figure 6-11.

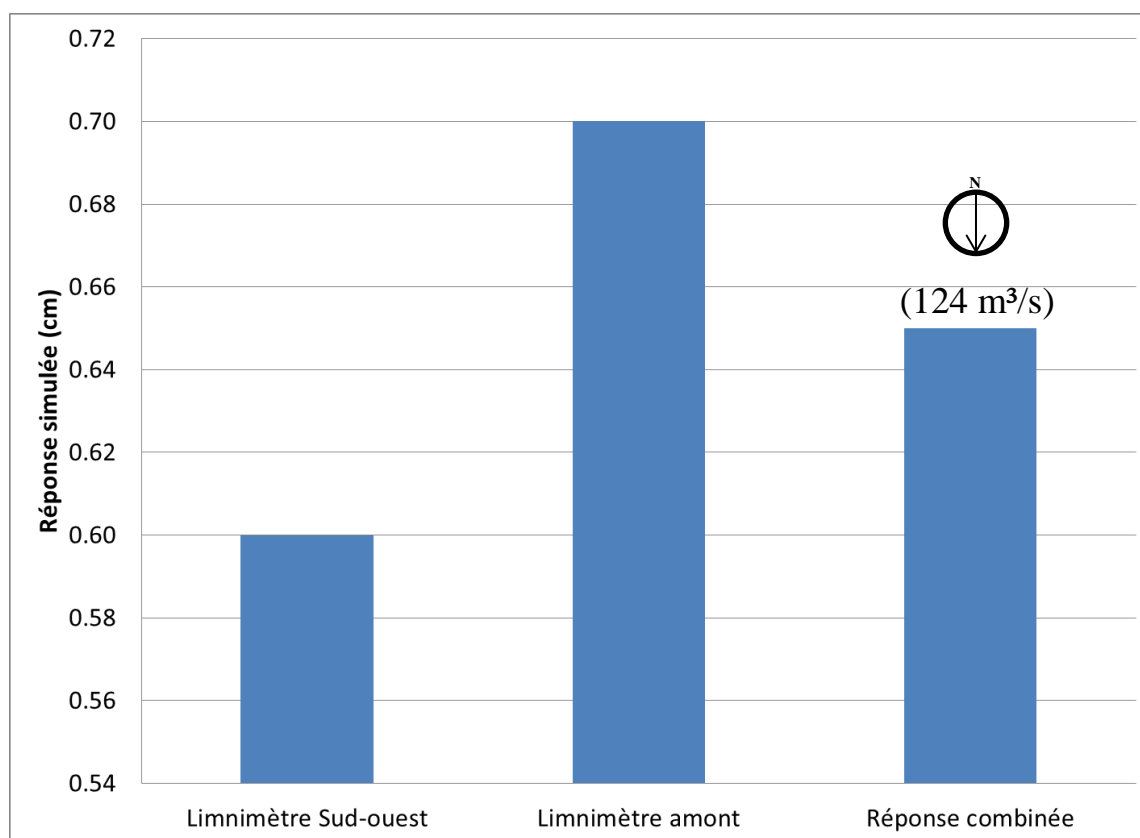
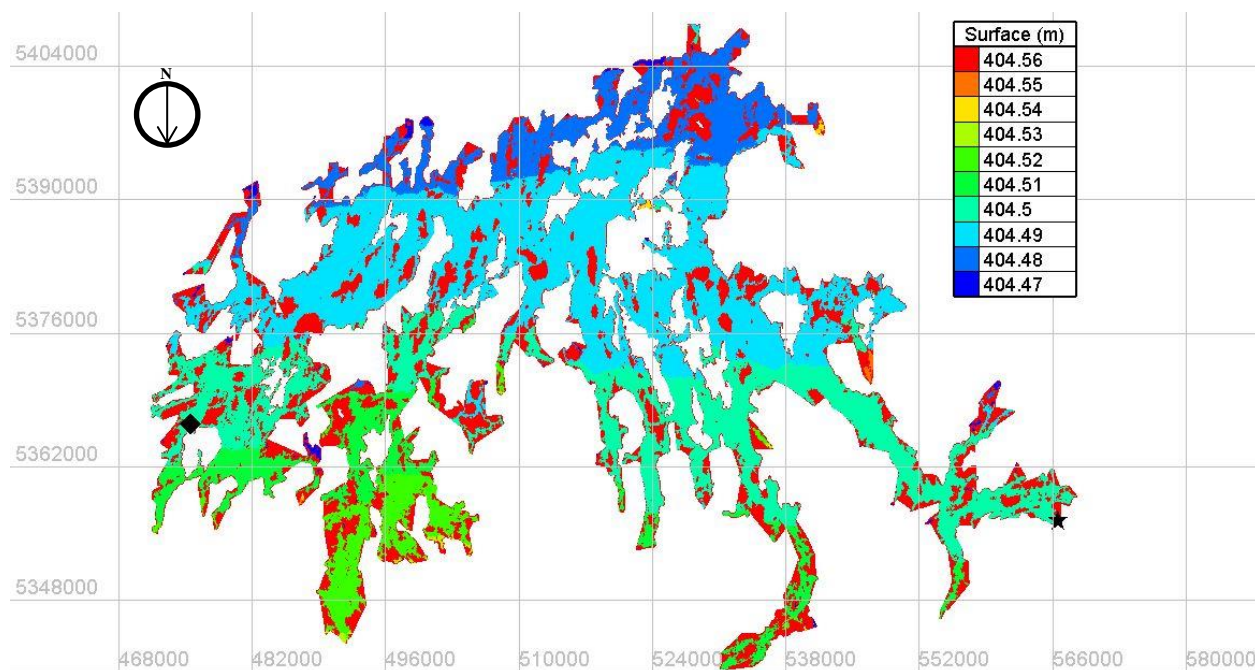


Figure 6-4 Estimation de l'incertitude d'apport naturel journalier pour un vent de 0° à 26 km/h avec un coefficient de traînée de  $1.0 \cdot 10^{-3}$

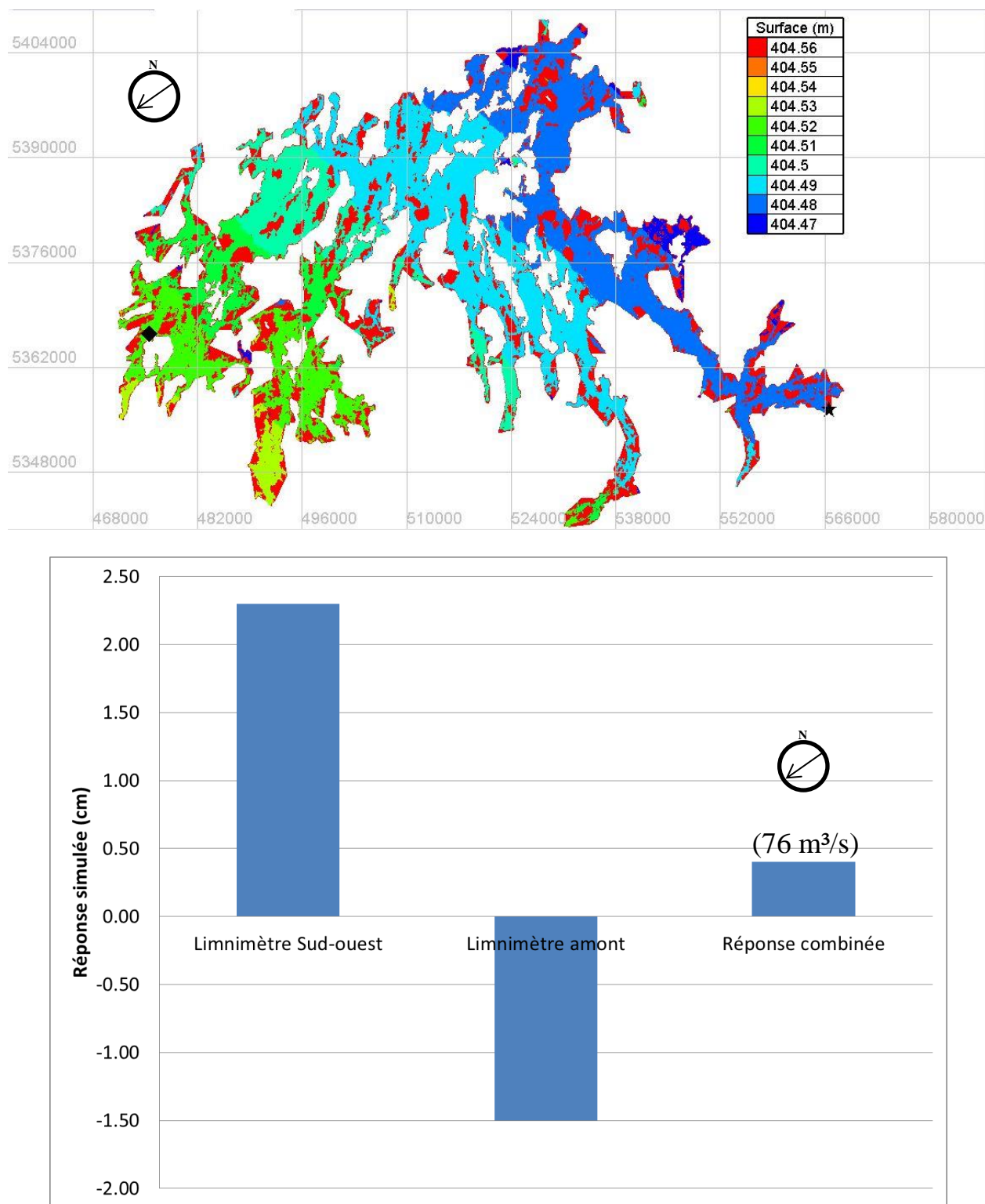


Figure 6-5 Estimation de l'incertitude d'apport naturel journalier pour un vent de 45° à 26 km/h avec un coefficient de traînée de  $1.0 \cdot 10^{-3}$

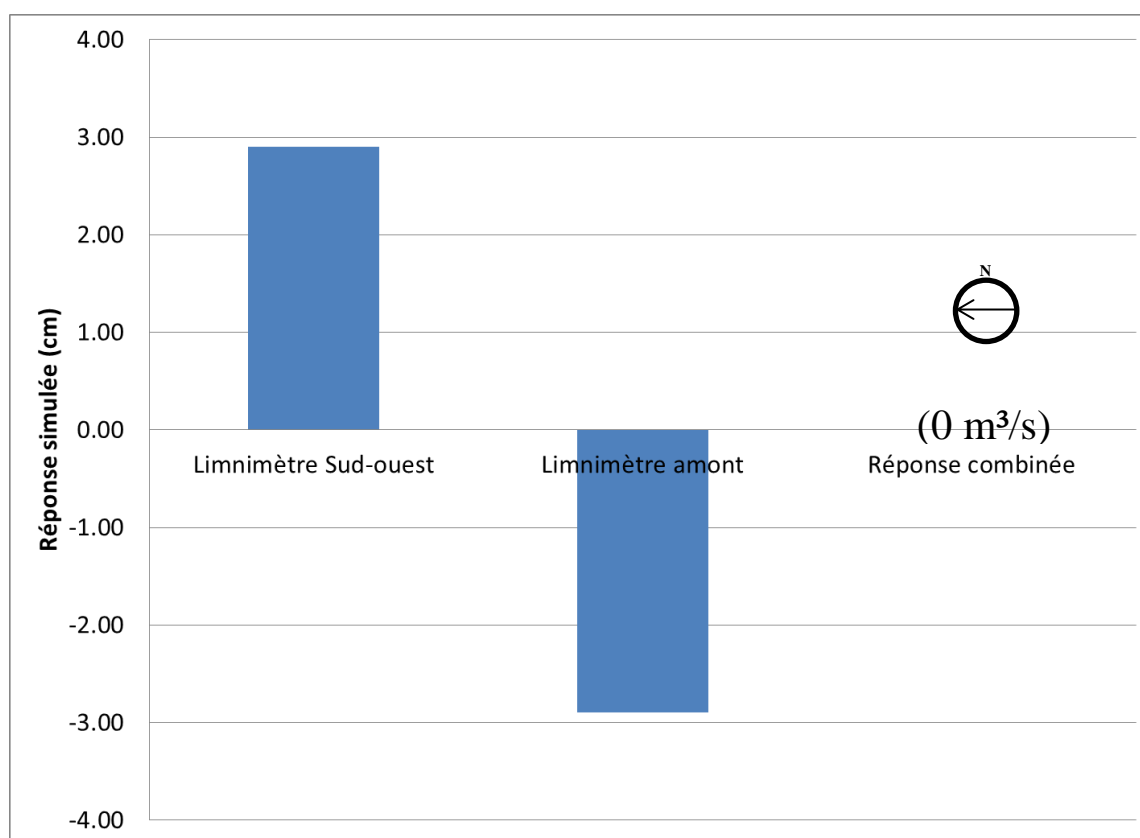
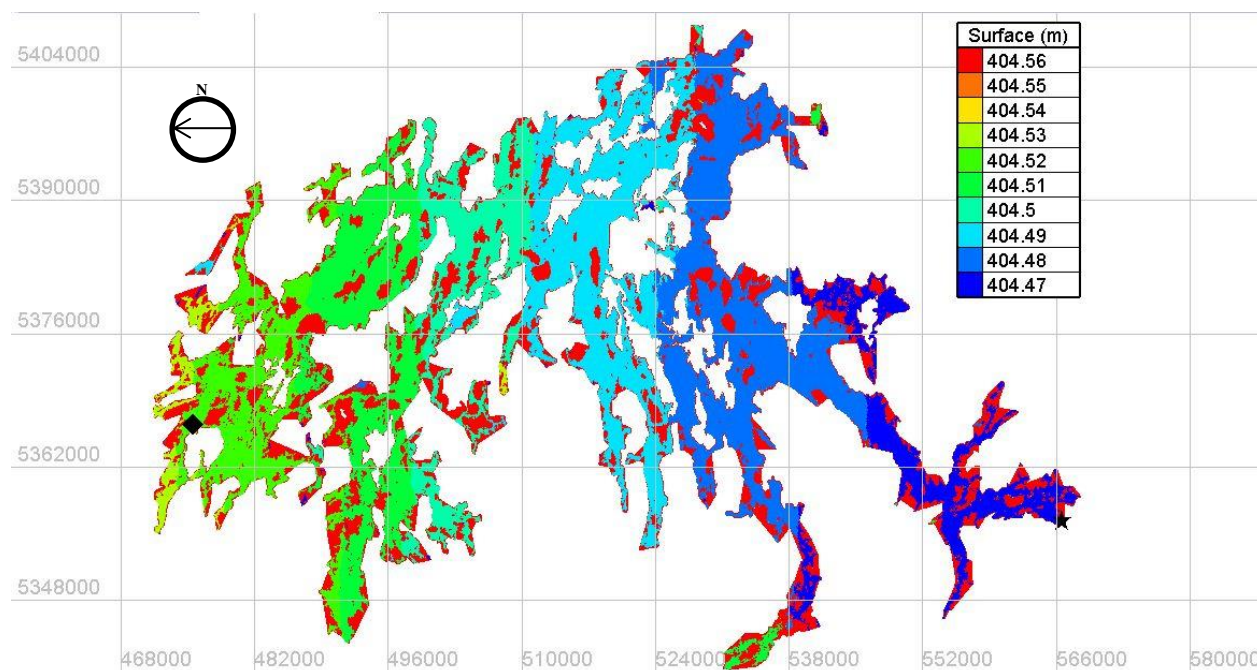


Figure 6-6 Estimation de l'incertitude d'apport naturel journalier pour un vent de 90° à 26 km/h avec un coefficient de traînée de  $1.0 \cdot 10^{-3}$

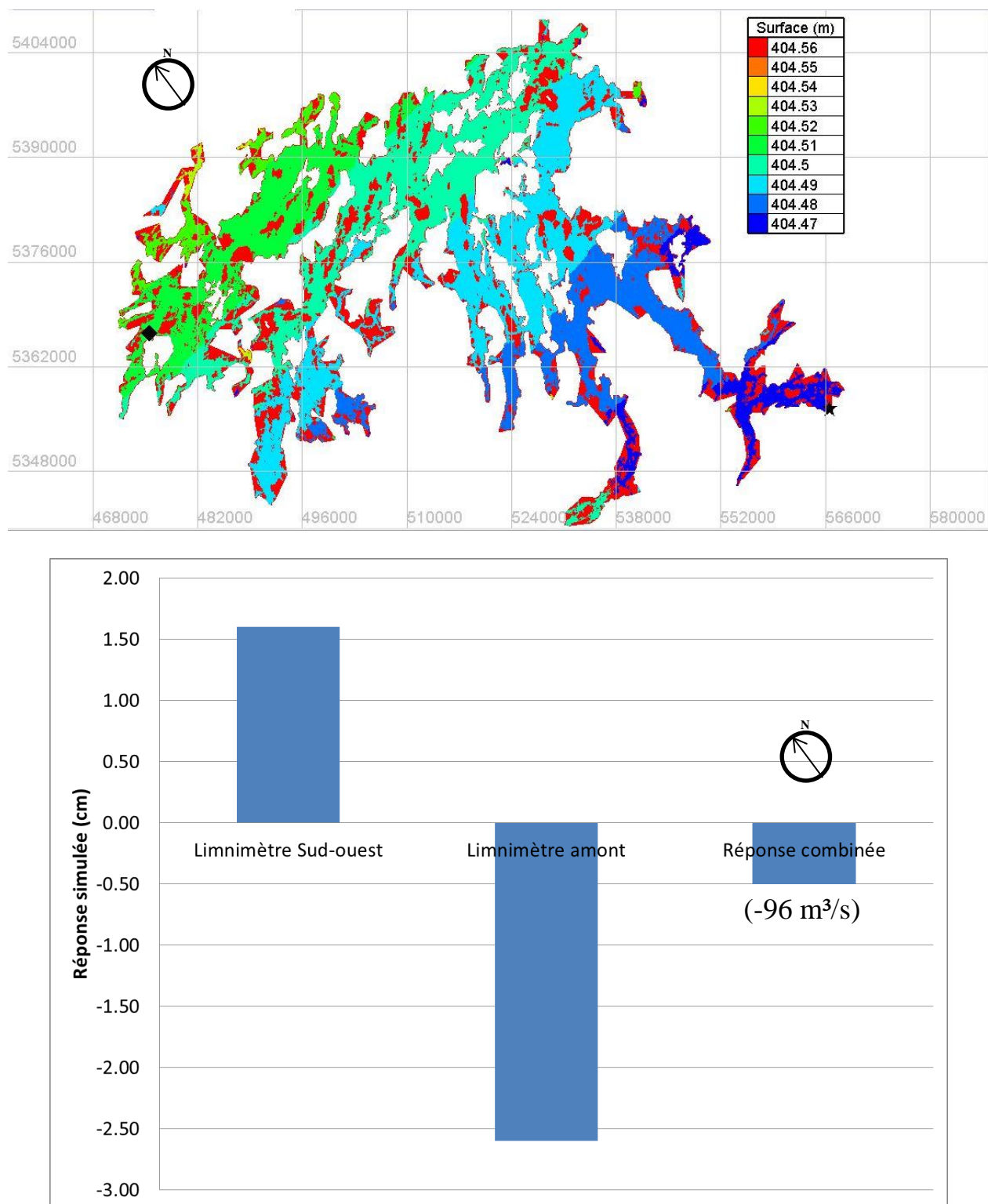


Figure 6-7 Estimation de l'incertitude d'apport naturel journalier pour un vent de 135° à 26 km/h avec un coefficient de traînée de  $1.0 \cdot 10^{-3}$

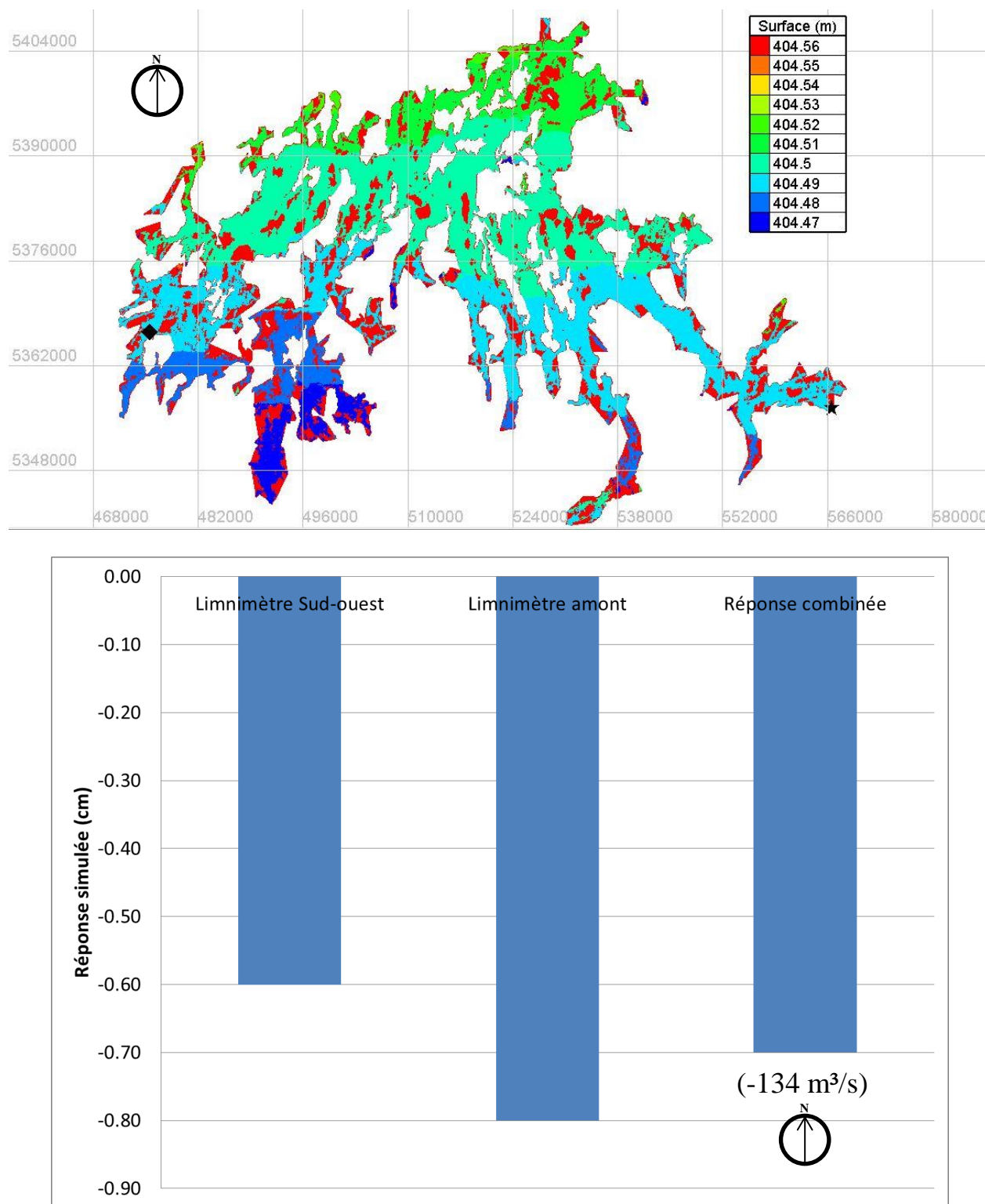


Figure 6-8 Estimation de l'incertitude d'apport naturel journalier pour un vent de 180° à 26 km/h avec un coefficient de traînée de  $1.0 \cdot 10^{-3}$

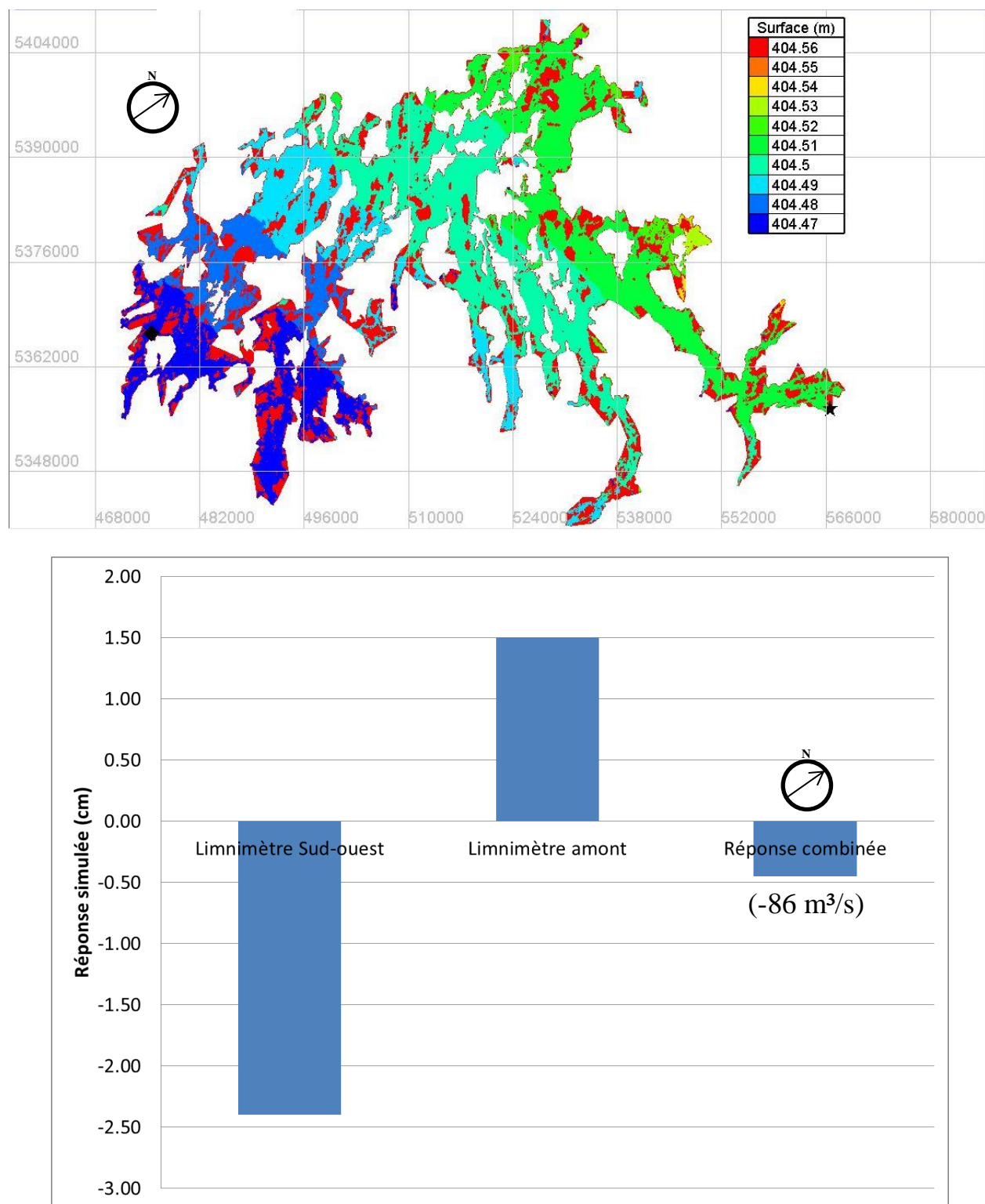


Figure 6-9 Estimation de l'incertitude d'apport naturel journalier pour un vent de 225° à 26 km/h avec un coefficient de traînée de  $1.0 \cdot 10^{-3}$

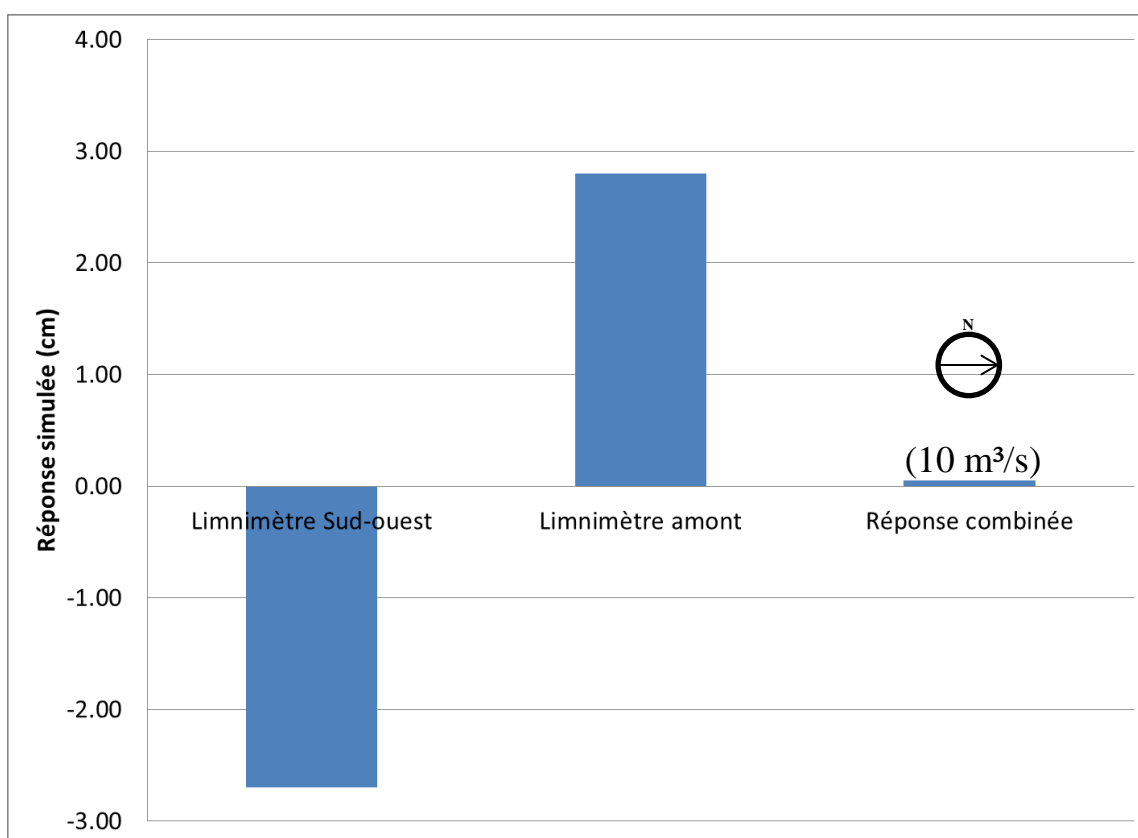
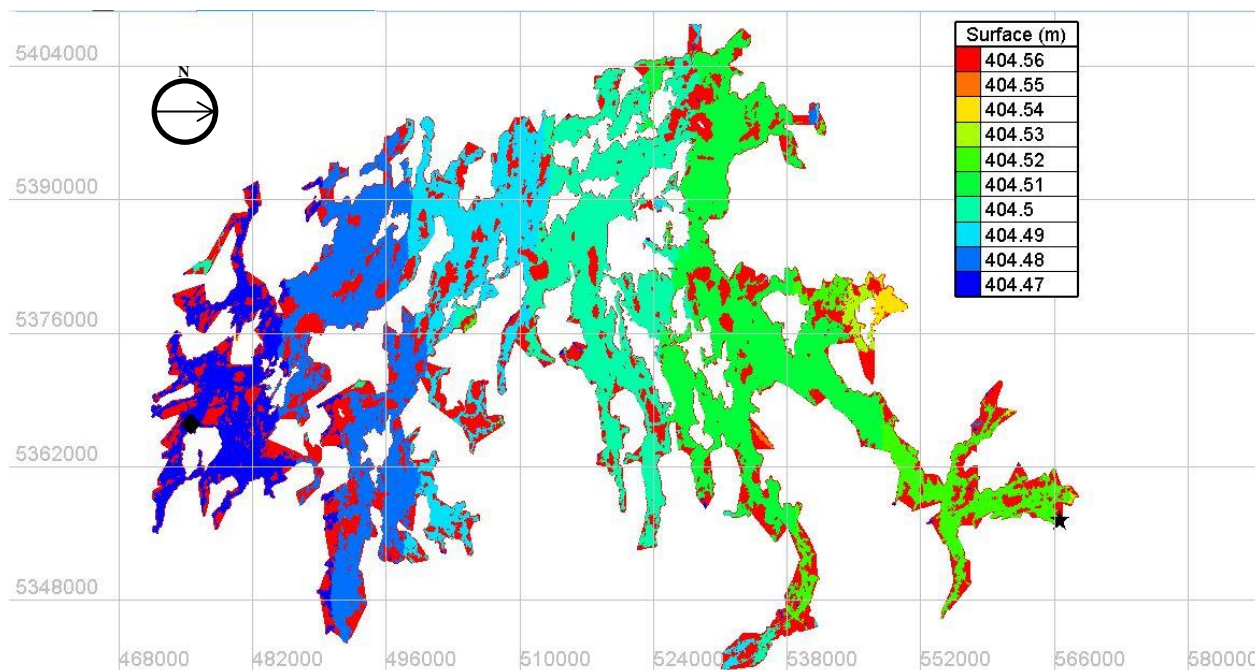


Figure 6-10 Estimation de l'incertitude d'apport naturel journalier pour un vent de  $270^\circ$  à 26 km/h avec un coefficient de traînée de  $1.0 \cdot 10^{-3}$

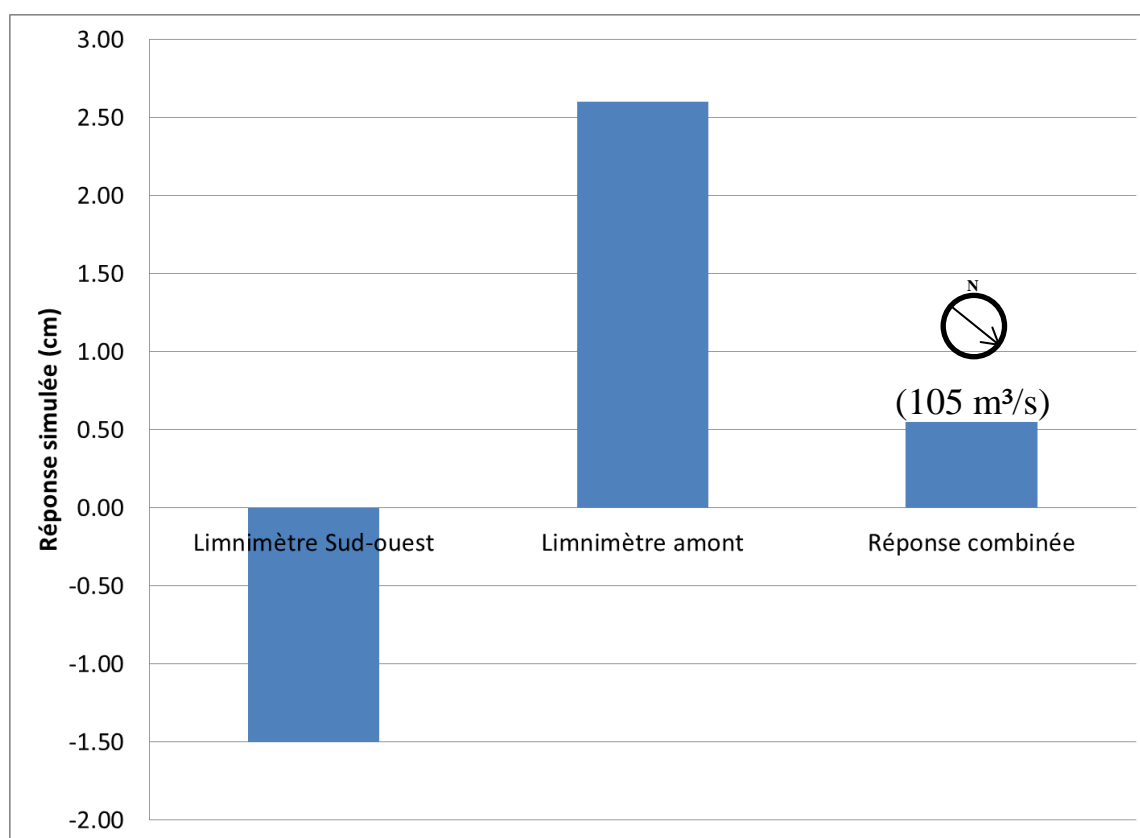
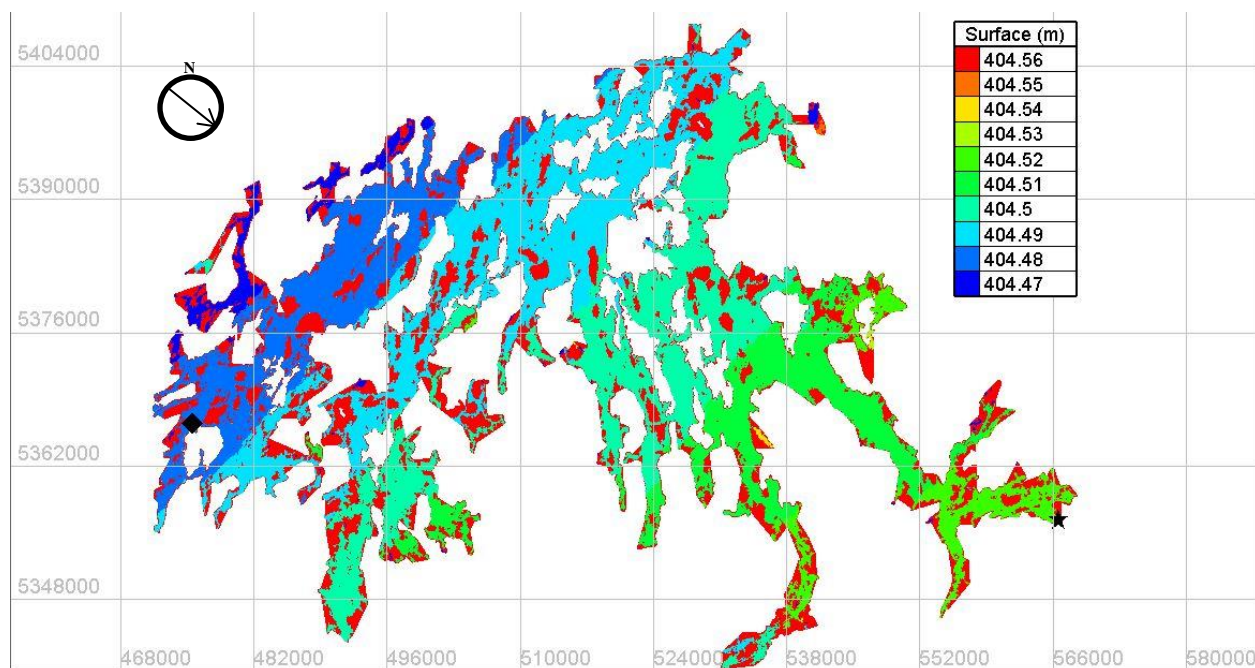


Figure 6-11 Estimation de l'incertitude d'apport naturel journalier pour un vent de 315° à 26 km/h avec un coefficient de traînée de  $1.0 \cdot 10^{-3}$

Comme il a été discuté précédemment, un coefficient de traînée de  $1.0 \times 10^{-3}$  donne la meilleure performance pour l'ensemble des simulations. Toutefois, afin d'augmenter la représentativité du modèle, il est possible de compiler et de traiter les résultats des 1848 simulations effectuées dans le cadre de la calibration afin de déterminer le meilleur coefficient de traînée pour chaque tranche de direction/vitesse du vent (voir Tableau 6-4).

À partir du Tableau 6-4, il est possible de remarquer que le coefficient de traînée du vent varie considérablement en fonction de la vitesse et de la direction du vent. Tout d'abord, lorsque le coefficient de traînée du vent est considéré variable en fonction de la vitesse du vent, on remarque qu'à de très faibles vitesses de vent, celui-ci est très élevé ( $3.7 \times 10^{-3}$  pour 5 km/h et  $2.8 \times 10^{-3}$  pour 10 km/h). À des vitesses de vent plus élevées, le coefficient de traînée se stabilise à  $1 \times 10^{-3}$ .

Lorsque le coefficient de traînée du vent est considéré variable en fonction de la vitesse et la direction du vent, celui-ci est pratiquement constant pour les directions  $0^\circ$  et  $270^\circ$  ( $1.4 \times 10^{-3}$  et  $1.0 \times 10^{-3}$ ). L'axe de  $90^\circ$  est le plus sensible pour toutes les classes de vitesses de vent : il varie de  $5.7 \times 10^{-3}$  pour des vitesses 5 km/h à  $1.8 \times 10^{-3}$  pour des vitesses de 30 km/h. Finalement, le coefficient de traînée pour la direction  $180^\circ$  est très élevé pour des faibles vitesses (5 et 10 km/h) et très faible pour les vitesses plus élevées ( $> 20$  km/h).

Tableau 6-4 Meilleur coefficient de traînée en fonction de la vitesse et la direction du vent

Vitesse du vent (km/h)	5				10				15				20				25				30			
Direction (deg.met)	0	90	180	270	0	90	180	270	0	90	180	270	0	90	180	270	0	90	180	270	0	90	180	270
Meilleur coeff. Traînée / Vitesse et Direction $\times 10^{-3}$ (--)	1.4	5.7	4.7	0.5	1.4	5.7	2.8	1.0	1.4	2.8	1.0	1.0	1.4	2.8	0.5	1.0	1.4	1.8	0.5	1.0	1.4	1.8	0.5	1.0
Meilleur coeff. Traînée / Vitesse $\times 10^{-3}$ (--)	3.7				2.8				1.2				1.0				1.0				1.0			

Après analyse des résultats, il est possible de déduire que l'utilisation d'un coefficient de traînée variable en fonction de la vitesse et de la direction du vent permet d'améliorer la performance de la modélisation et conséquemment d'améliorer l'estimation de l'incertitude de l'apport naturel calculé par bilan hydrique.

Afin d'améliorer suffisamment l'estimation de l'incertitude du vent, il faudrait augmenter les intervalles de discrétisation des directions. Toutefois, cela augmenterait considérablement le nombre et le temps de simulations à effectuer. Dans ce cas, il est préférable d'envisager des méthodes de modélisation moins coûteuses en temps de simulation par exemple la régression non paramétrique.

### **6.3 Modélisation des différences de niveaux par régression non paramétrique**

La régression non paramétrique permet de tracer la courbe qui s'ajuste le mieux à un nuage de points d'observation. La régression n'a alors aucune forme prédéfinie. Cette méthode a été utilisée par Haché et al. (2003) pour modéliser les différences de niveaux entre les limnimètres d'un réservoir en fonction des caractéristiques du vent (vitesse et direction).

Dans cette section, les régressions à une variable explicative établies par Haché et al. (2003) seront mises à jour par la méthode des splines lissantes (voir section 2.3.7; équation (2.14)) avec des données plus récentes. Ensuite, la régression à deux variables explicatives sera employée avec la méthode de LOWESS (voir section 2.3.7) pour modéliser les différences de niveaux en fonction des caractéristiques du vent. Il sera ensuite possible de comparer la performance de toutes les méthodes de modélisation à état permanent effectuées au cours de ce chapitre.

#### **6.3.1 Régression non paramétrique à une variable explicative**

La régression non paramétrique (RNP) à une variable explicative est effectuée dans cette section avec la méthode des splines lissantes (voir section 2.3.7) pour modéliser les différences de niveaux entre les limnimètres des réservoirs Gouin et Outardes 4 en fonction des caractéristiques du vent. La variable explicative est la direction du vent. Celle-ci est représentée à l'abscisse des graphiques de la Figure 6-12 et de la Figure 6-13.

De plus, la vitesse du vent est discrétisée en 6 classes :

1. 5 km/h correspond à des vents avec des vitesses entre 2.5 km/h et 7.5 km/h
2. 10 km/h correspond à des vents avec des vitesses entre 7.5 km/h et 12.5 km/h
3. 15 km/h correspond à des vents avec des vitesses entre 12.5 km/h et 17.5 km/h
4. 20 km/h correspond à des vents avec des vitesses entre 17.5 km/h et 22.5 km/h
5. 25 km/h correspond à des vents avec des vitesses entre 22.5 km/h et 27.5 km/h
6. 30 km/h correspond à des vents avec des vitesses entre 27.5 km/h et 32.5 km/h

L'équation (2.14) est appliquée avec un facteur de lissage de  $10^{-6}$  afin d'obtenir les relations présentées à la Figure 6-12 et à la Figure 6-13. Le facteur de lissage a été sélectionné par essai erreur dans le but d'améliorer la performance de l'ajustement et l'aspect visuel de la relation.

Les régressions non paramétriques présentées à la Figure 6-12 et à la Figure 6-13 permettent d'observer les directions et vitesses de vent qui sont susceptibles de créer une différence de niveau importante entre deux limnimètres. On peut également remarquer que les relations établies par Haché et al. (2003) comportent des trous. Ces auteurs ont décidé de masquer certains endroits sur la courbe où il n'y avait pas assez d'observations. Leurs résultats sont donc illustrés de la même façon qu'ils ont été présentés dans leur article.

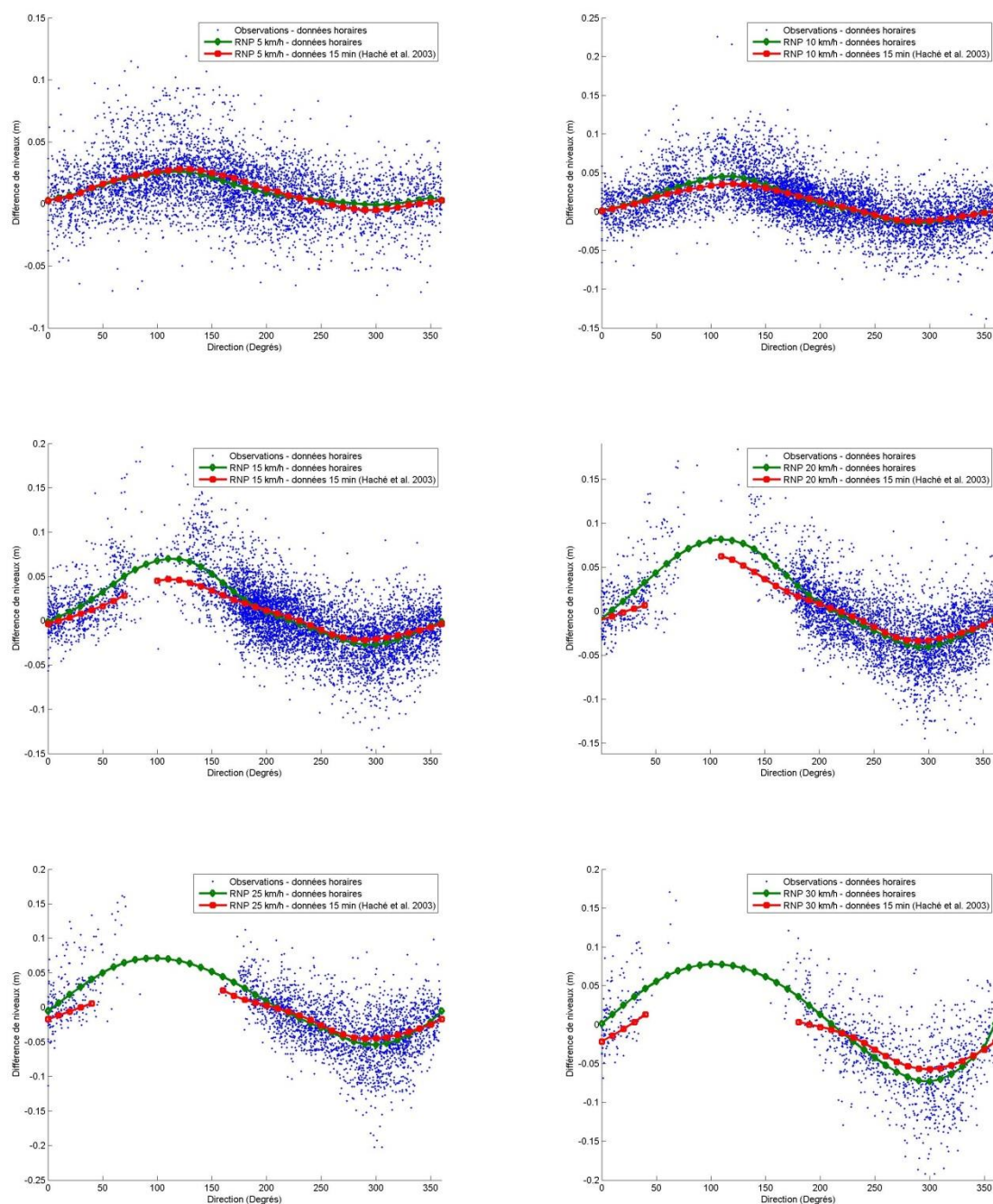


Figure 6-12 Mise à jour des RNP à une variable explicative pour estimer les différences de niveaux entre les instruments Sud-ouest et baie de Kikendatch (amont) du réservoir Gouin

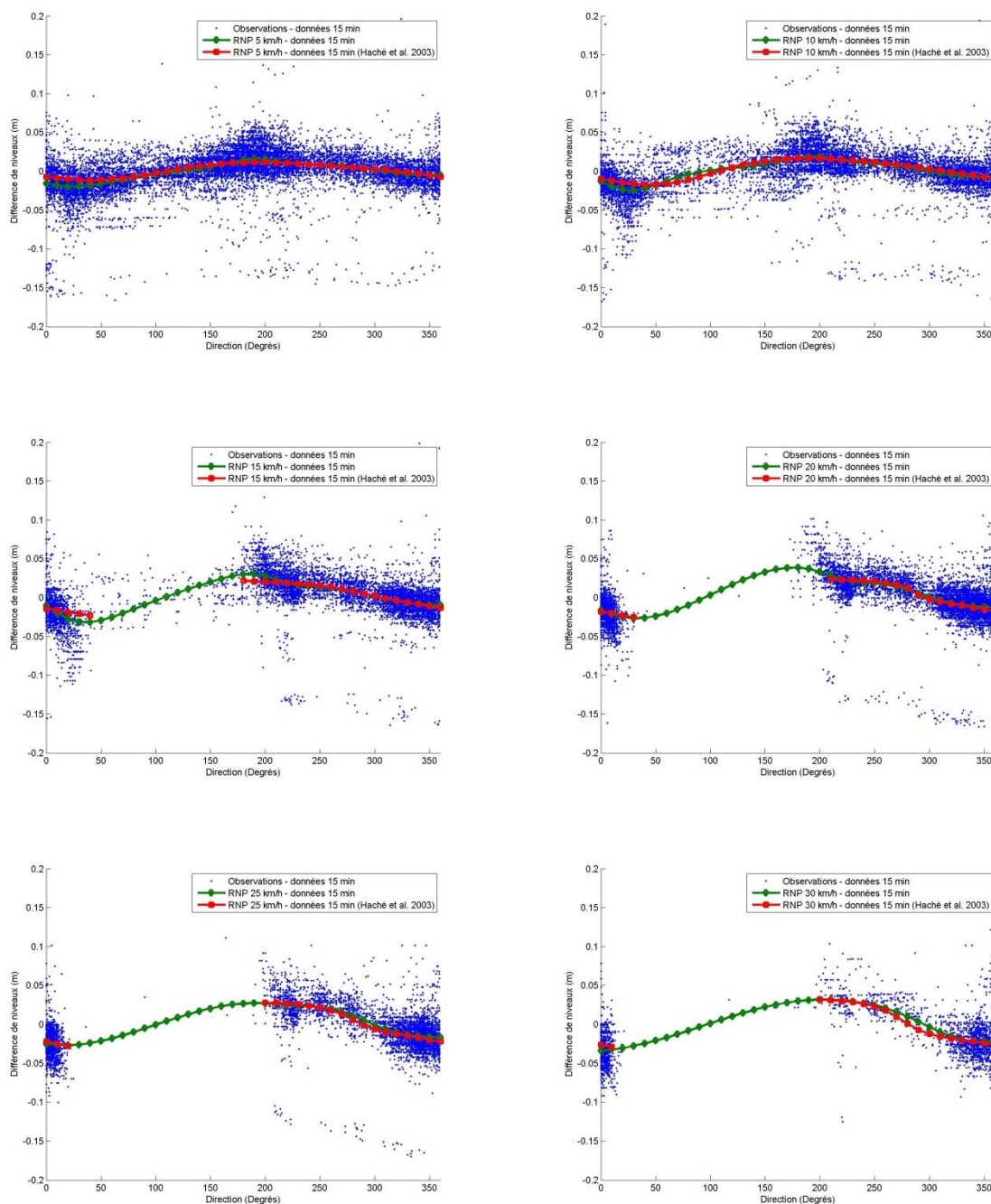


Figure 6-13 Mise à jour des RNP à une variable explicative pour estimer les différences de niveaux entre les instruments Nord et centrale (amont) du réservoir Outardes 4

Dans le but d'alléger le rapport, les relations entre les autres limnimètres du réservoir Outardes 4 sont présentées à l'annexe 2.

La mise à jour de la relation entre les limnimètres du réservoir Gouin est présentée à la Figure 6-12. Les nouvelles relations ont été établies avec les données de 1997-1998 et de 2005-2012 avec un intervalle de mesure horaire alors que celles de Haché et al. (2003) ont été établies avec les données de 1997-1998 avec un intervalle de mesure aux 15 minutes. Malgré que les nouvelles relations n'ont pas été établies selon le même intervalle de temps entre les mesures que celles établies par Haché et al. (2003), il ne semble pas y avoir d'écart majeur entre les nouvelles et les anciennes relations. On peut cependant observer des écarts dans la région entre 75° et 150° puisque cette zone contient très peu d'observations.

La mise à jour de la relation entre les limnimètres nord et amont du réservoir Outardes 4 est présentée à la Figure 6-13. Les nouvelles relations ont été établies avec les données de 2005-2012 avec un intervalle de mesure aux 15 minutes alors que les relations établies par Haché et al. (2003) ont été établies avec les données de 1997-1998 avec un intervalle de mesure aux 15 minutes. Malgré que les nouvelles relations n'ont pas été établies avec la même base de données que celles établies par Haché et al. (2003), il n'y a pas d'écart notable entre les nouvelles et les anciennes relations.

### **6.3.2 Régression non paramétrique à deux variables explicatives**

Au lieu d'ajuster une courbe lisse à un ensemble d'observations, il est possible d'ajuster un plan à un nuage de points d'observations. Dans cette section, la régression non paramétrique à deux variables explicatives sera effectuée par la méthode de LOWESS (voir section 2.3.7) pour modéliser les différences de niveaux entre les limnimètres en fonction des caractéristiques du vent (vitesse et direction). À ce moment, les deux variables explicatives sont la vitesse et la direction du vent. Les relations ne sont plus effectuées selon différentes classes de vitesse du vent comme avec la régression non paramétrique à une variable explicative.

La méthode de LOWESS nécessite de choisir un facteur de lissage. Le facteur de lissage sélectionné est de 0.1. Il a été sélectionné par essais erreurs dans le but d'améliorer la performance de l'ajustement et l'aspect visuel de la relation. De plus, les différences de niveaux observées pour lesquelles une grande variation de débit sortant a été observée ont été exclues afin d'éviter de contaminer les relations non paramétriques avec l'effet des manœuvres hydrauliques.

Les relations obtenues sont illustrées par la Figure 6-14 à la Figure 6-17.

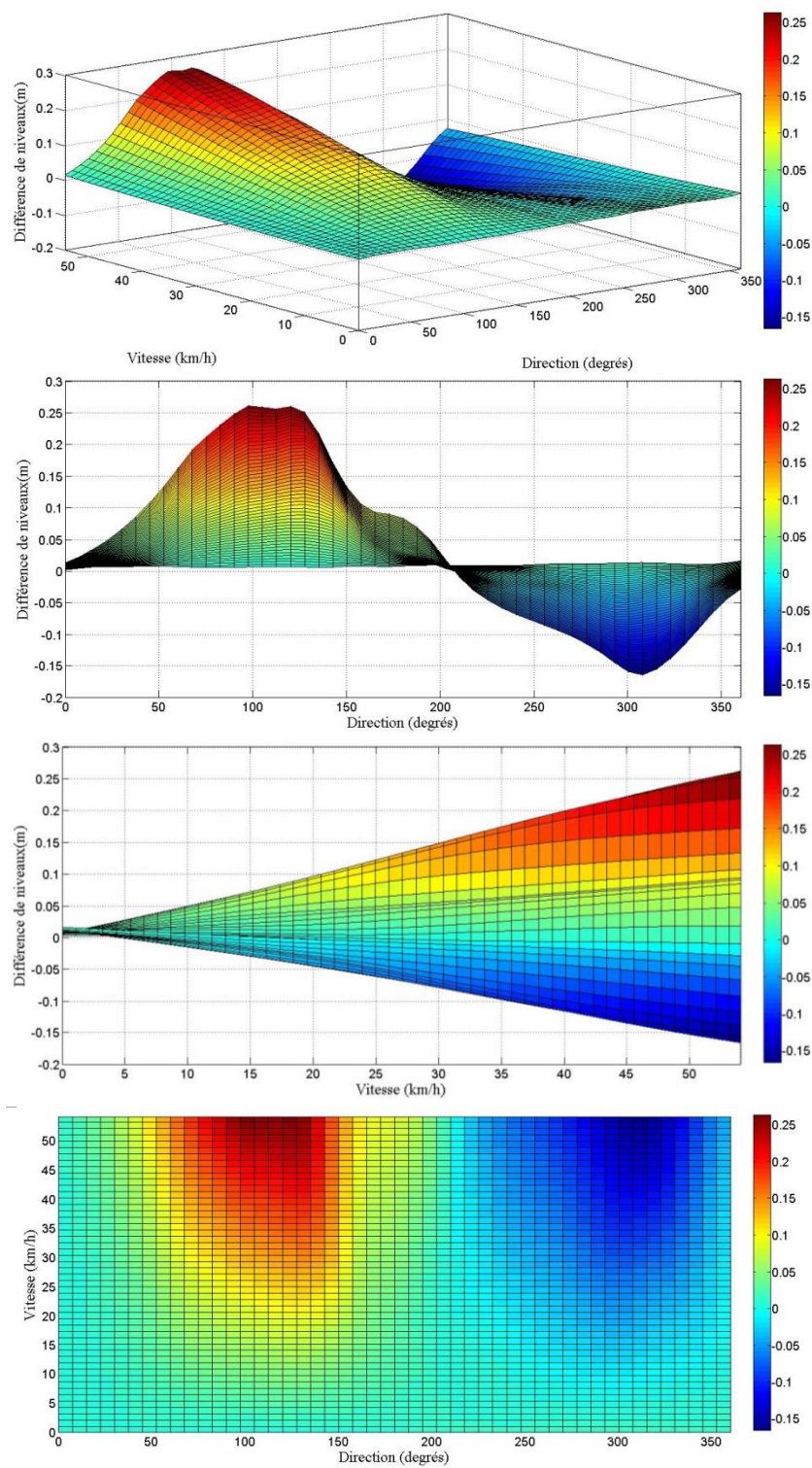


Figure 6-14 RNP à deux variables explicatives pour estimer les différences de niveaux entre les instruments Sud-ouest et baie de Kikendatch (amont) du réservoir Gouin

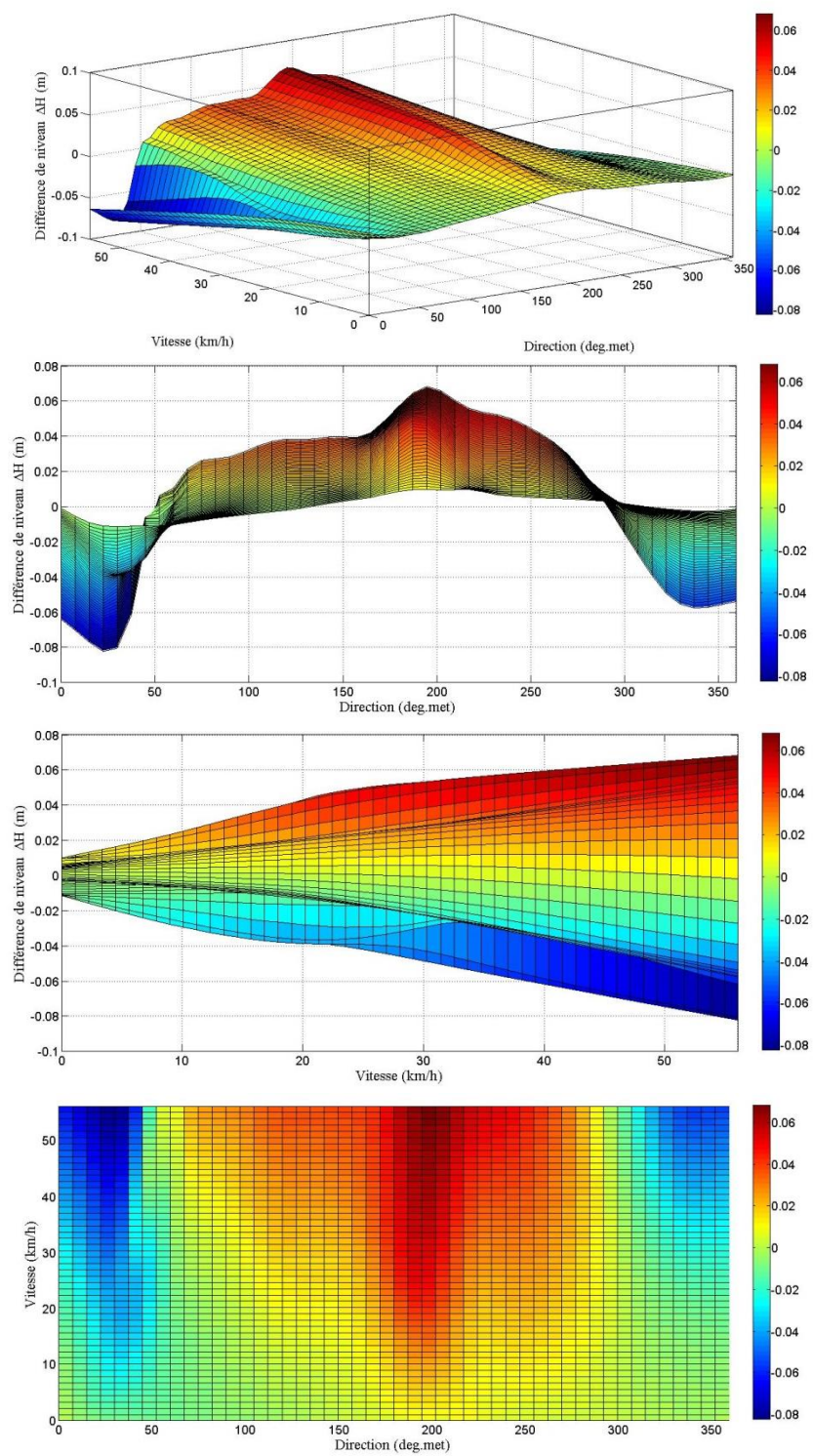


Figure 6-15 RNP à deux variables explicatives pour estimer les différences de niveaux entre les instruments Nord et amont du réservoir Outardes 4

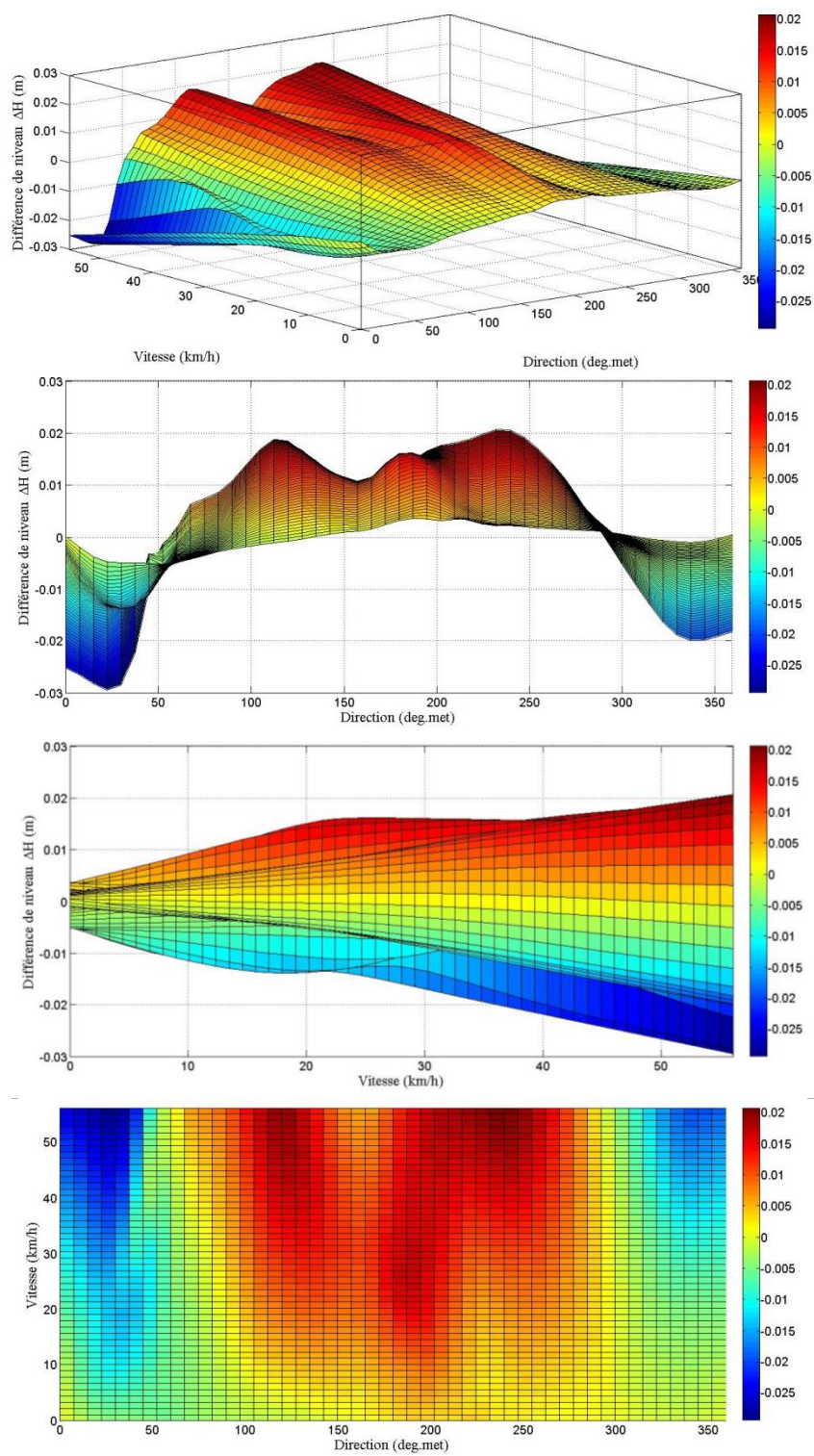


Figure 6-16 RNP à deux variables explicatives pour estimer les différences de niveaux entre les instruments Sud et amont du réservoir Outardes 4

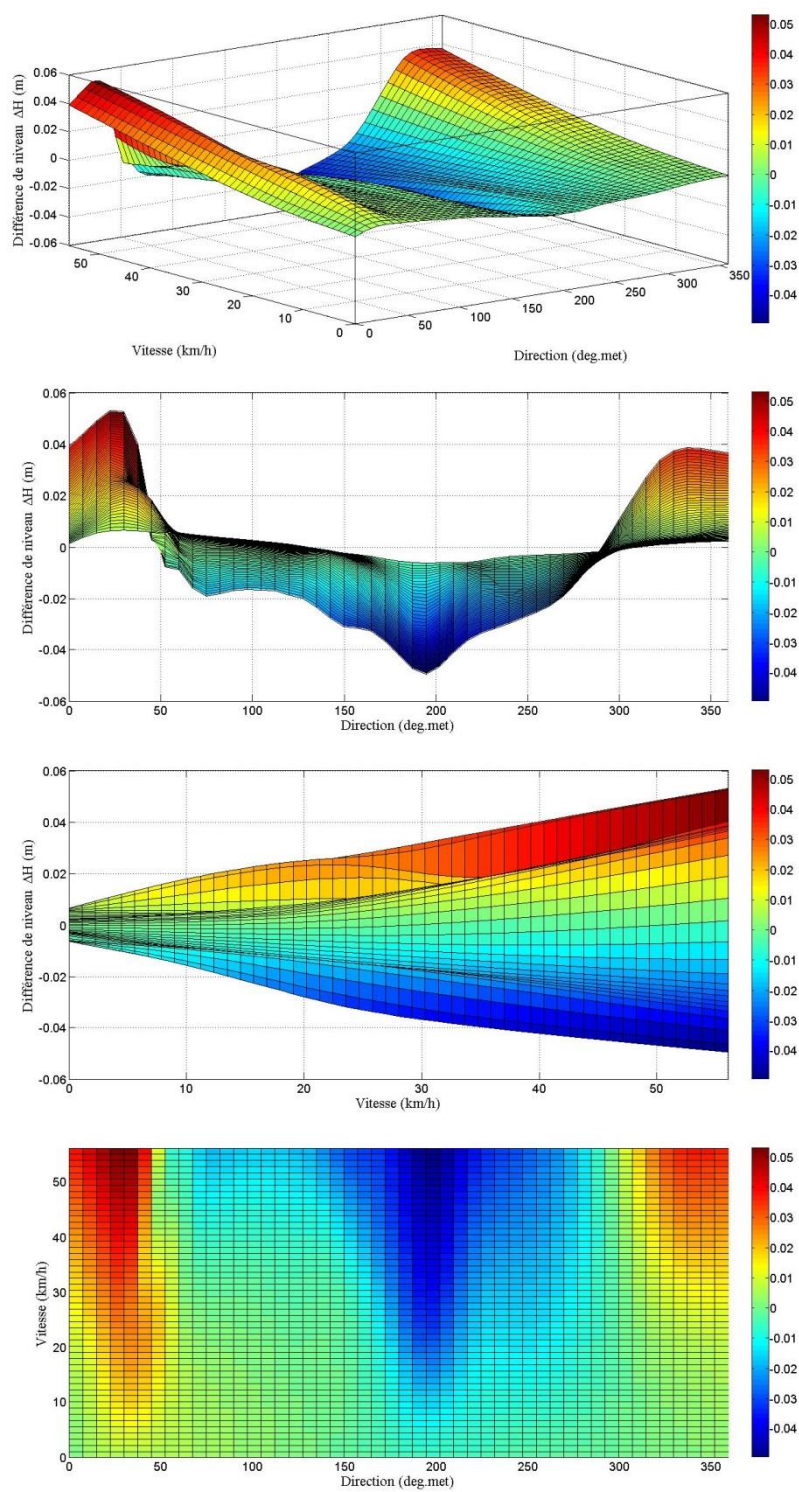


Figure 6-17 RNP à deux variables explicatives pour estimer les différences de niveaux entre les instruments Sud et Nord du réservoir Outardes 4

Pour le réservoir Gouin, on peut remarquer à la Figure 6-14 que l'effet du vent sur les différences de niveaux est non symétrique. Par exemple, pour des rafales de 60 km/h, la différence de niveau estimée est de 25 cm pour des vents de 100° alors qu'elle est de -15 cm pour des vents de 310°.

Pour le réservoir Outardes 4, pour les trois relations illustrées de la Figure 6-15 à la Figure 6-17, on peut remarquer qu'il y a trois axes/directions sensibles à l'effet du vent : 30°, 190° et 340°. La différence de niveau estimée maximale pour toutes les relations confondues est de l'ordre de 7 cm pour des vents de 60 km/h.

#### **6.4 Comparaison des méthodes de modélisation en écoulement permanent**

Bien qu'il soit intéressant de visualiser les relations de différence de niveaux développées par modélisation hydrodynamique et par régression non paramétrique, il est également important de comparer la performance de chaque méthode de modélisation en condition d'écoulement permanent. La racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) a été sélectionnée comme indicateur de performance afin d'assurer une cohérence avec ce qui a déjà été fait par Haché et al. (2003). La comparaison de la performance de toutes les méthodes de modélisation expérimentées au cours de ce chapitre est présentée au Tableau 6-5.

Tableau 6-5 Comparaison du RMSE des méthodes de modélisation en condition d'écoulement permanent pour le réservoir Gouin

Intensité du vent (km/h)	RMSE des différences de niveaux simulés VS observés (cm)						
	M0	Modélisation hydrodynamique				Régression non paramétrique	
		C <sub>D</sub> constant (1*10 <sup>-3</sup> )	C <sub>D</sub> variable en fonction de la vitesse	C <sub>D</sub> variable en fonction de la vitesse/direction	C <sub>D</sub> et niveau d'exploitation variables en fonction de la vitesse/direction	1 variable explicative	2 variables explicatives
5	2.68	2.57	2.45	2.25	<u>2.25</u>	2.15	<u>2.13</u>
10	3.33	3.09	2.95	2.66	<u>2.66</u>	2.46	<u>2.44</u>
15	3.61	3.24	3.23	3.00	<u>2.99</u>	2.66	<u>2.63</u>
20	4.14	3.39	3.39	3.33	<u>3.32</u>	2.96	<u>2.93</u>
25	5.02	3.78	<u>3.78</u>	3.81	3.79	3.36	<u>3.33</u>
30	6.42	4.51	4.51	4.53	<u>4.49</u>	3.90	<u>3.82</u>
Global	3.86	3.25	3.21	3.06	<u>3.05</u>	2.70	<u>2.66</u>

**Légende :**Meilleur résultat pour la modélisation hydrodynamiqueMeilleur résultat pour toutes méthodes de modélisation confondues

On peut remarquer au Tableau 6-5 que pour toutes méthodes de modélisation à état permanent confondues, la régression non paramétrique à deux variables explicatives donne les meilleurs résultats en termes de qualité d'ajustement aux observations. Pour la modélisation hydrodynamique, la considération d'un niveau d'exploitation variable jumelé avec l'utilisation d'un coefficient de traînée variable en fonction de la vitesse et la direction du vent a donné les meilleurs résultats. Afin d'améliorer la performance de la modélisation hydrodynamique, il serait nécessaire d'augmenter le nombre d'intervalles de discrétisation pour la direction du vent. Ceci nécessiterait un temps de calcul considérable. Il est donc préférable d'utiliser la régression non paramétrique à deux variables explicatives lorsqu'il y a suffisamment d'observations.

Cependant, un des avantages des modèles hydrodynamiques par rapport aux méthodes de régressions est qu'il est possible d'obtenir une estimation de la variation du niveau d'eau à des endroits du réservoir où il n'y a pas de limnimètre. Par exemple, en minimisant les réponses simulées combinées pour toutes les conditions de vent qui peuvent être observées au réservoir Gouin, il est possible de déterminer l'emplacement optimal d'un troisième limnimètre pour contrebalancer l'effet du vent de part et d'autre du réseau de jauges limnimétriques. Si pour une quelconque raison Hydro-Québec désirait ajouter un limnimètre au réservoir Gouin, l'emplacement idéal en considérant une méthode de combinaison arithmétique est illustré à la Figure 6-18.

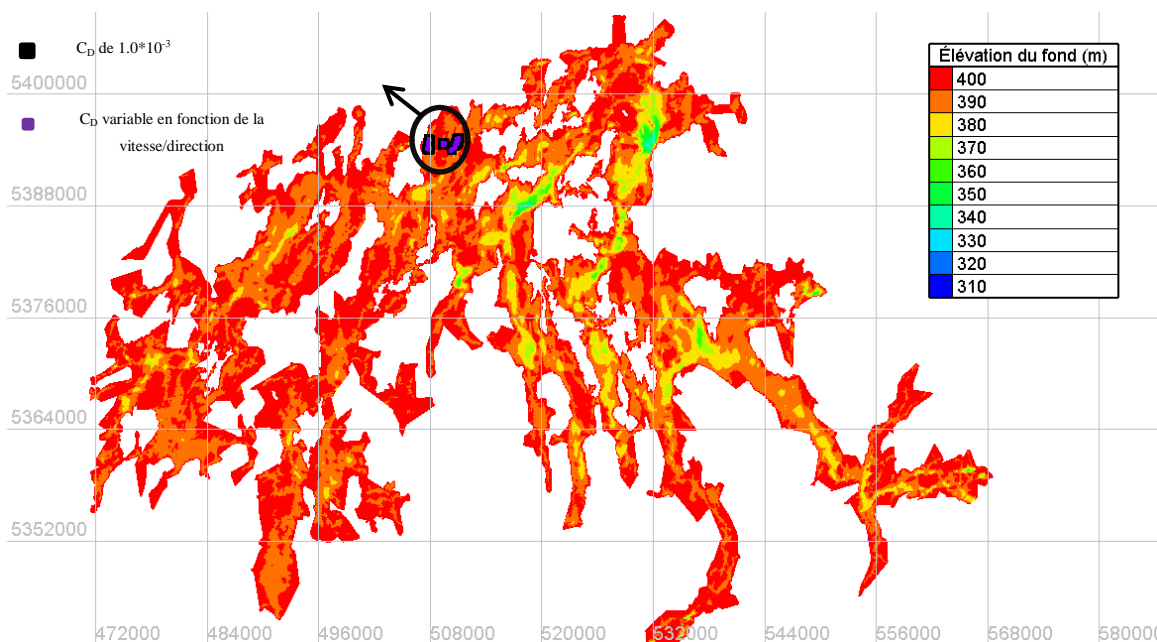


Figure 6-18 Zone d'emplacement optimal d'un troisième limnimètre pour le réservoir Gouin déterminée en considérant une méthode de combinaison arithmétique et deux formulations du coefficient de traînée du vent

On peut observer à la Figure 6-18 qu'il n'y pas de différence quant aux emplacements optimaux déterminés en considérant un coefficient de traînée du vent constant ou variable.

Finalement, l'utilisation de la modélisation hydrodynamique a permis de constater que la formulation des différences de niveaux n'est pas idéale pour étudier les incertitudes de l'effet du vent dans l'équation de bilan hydrique. Il a été déterminé qu'il est préférable d'étudier les réponses plutôt que les différences de niveaux (voir Tableau 6-3, section 6.2.2.2).

## 6.5 Modélisation des réponses par régression non paramétrique

Il a été déterminé à la section 6.2.2.2 que l'erreur maximale d'apport naturel causée par le vent survient lorsque la réponse combinée des limnimètres est maximale. Puisqu'il a été déterminé à la section 6.4 que la régression non paramétrique à deux variables explicatives est la méthode la plus performante pour modéliser les effets de vent sur les réservoirs, cette méthode sera retenue pour modéliser les réponses de l'effet de vent sur les lectures de limnimètres. Étant donné que cette méthode est rapide et efficace, les relations non paramétriques obtenues à cette

section seront utilisées ultérieurement au Chapitre 8 pour corriger les effets de vent dans l'équation de bilan hydrique.

La formulation de la réponse à un limnimètre est donnée par :

$$R_t = L_t - L_{t-1} \quad (6.5)$$

Où

- $R_t$  est la réponse du vent à un limnimètre à l'instant  $t$
- $L_t$  est le niveau enregistré par un limnimètre à l'instant  $t$
- $t$  dépend de l'intervalle de temps entre les mesures de l'anémomètre et de la girouette

Avant de produire les relations non paramétriques, il est important de retirer l'effet de l'écoulement de l'eau dans l'équation (6.5). Pour cela, la procédure illustrée à la Figure 6-3 a été utilisée.

Finalement, les réponses observées pour lesquelles une grande variation de débit sortant a été observée ont été exclues afin d'éviter de contaminer les relations non paramétriques avec l'effet des manœuvres hydrauliques.

Les relations non paramétriques des réponses dues au vent sont présentées de la Figure 6-19 à la Figure 6-20 pour le réservoir Gouin et de la Figure 6-21 à la Figure 6-23 pour le réservoir Outardes 4.

Pour le réservoir Gouin, le limnimètre amont (voir Figure 6-19) est très peu influencé par des vents de  $0^\circ$  à  $200^\circ$ . Toutefois, pour des vents horaires alignés de  $200^\circ$  à  $360^\circ$ , les réponses au limnimètre peuvent atteindre jusqu'à 2.3 cm. Pour le limnimètre Sud-ouest (voir Figure 6-20), l'effet du vent semble symétrique. La réponse maximale est de l'ordre de 1 cm et survient pour des directions de vent de  $90^\circ$  et  $215^\circ$  à une vitesse horaire de 60 km/h.

Pour le réservoir Outardes 4, le limnimètre amont (voir Figure 6-21) est sensible aux directions de vent  $100^\circ$ ,  $150^\circ$ ,  $210^\circ$  et de  $275^\circ$  à  $360^\circ$ . Pour une durée de vent de 15 minutes à une vitesse de 60 km/h, la réponse maximale à ce limnimètre peut atteindre 0.1 cm. Le limnimètre Nord (voir Figure 6-22), est sensible aux directions de vent entre  $50^\circ$  et  $200^\circ$  et entre  $300^\circ$  à  $360^\circ$ . Pour une durée de vent de 15 minutes à une vitesse de 60 km/h, la réponse maximale à ce

limnimètre peut atteindre 0.3 cm. Finalement, le limnimètre Sud (voir Figure 6-23) est sensible aux directions de vent entre 40° et 60°, entre 140° et 160° et entre 290° et 340°. Pour une durée de vent de 15 minutes à une vitesse de 60 km/h, la réponse maximale à ce limnimètre peut atteindre 0.2 cm.

Pour obtenir l'incertitude d'apport à partir de ces réponses, il serait nécessaire dans un premier temps de fixer un niveau de référence. Ensuite, il serait nécessaire d'évaluer les réponses à chaque limnimètre pour les pas de temps  $t$  et  $t-1$ . Finalement, en combinant ces réponses par une pondération arithmétique, l'erreur en niveau d'eau pourrait être convertie en erreur en  $\text{m}^3/\text{s}$ .

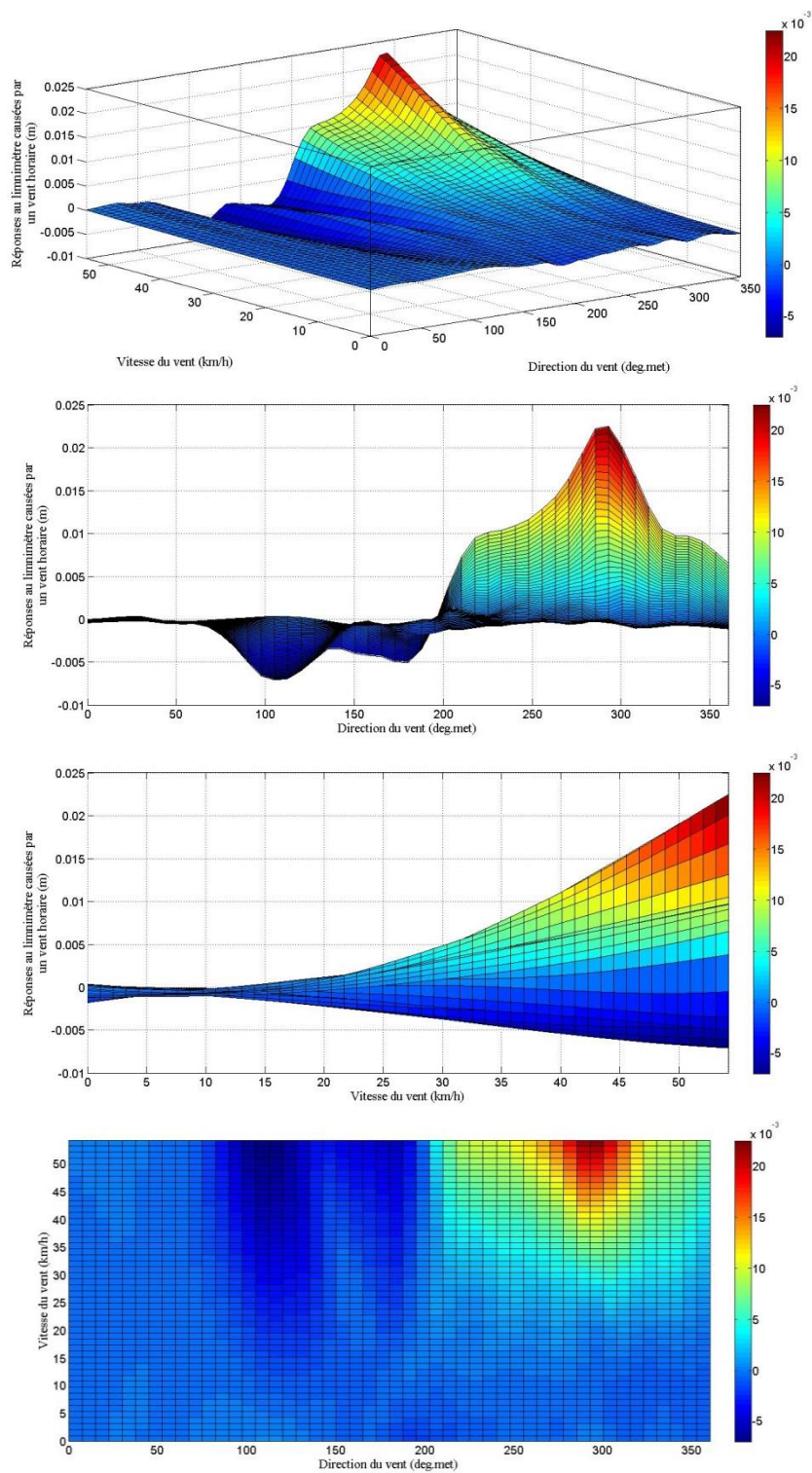


Figure 6-19 Régression non paramétrique de la réponse du limnimètre Baie de Kikendatch (amont) du réservoir Gouin sous l'influence d'un vent horaire

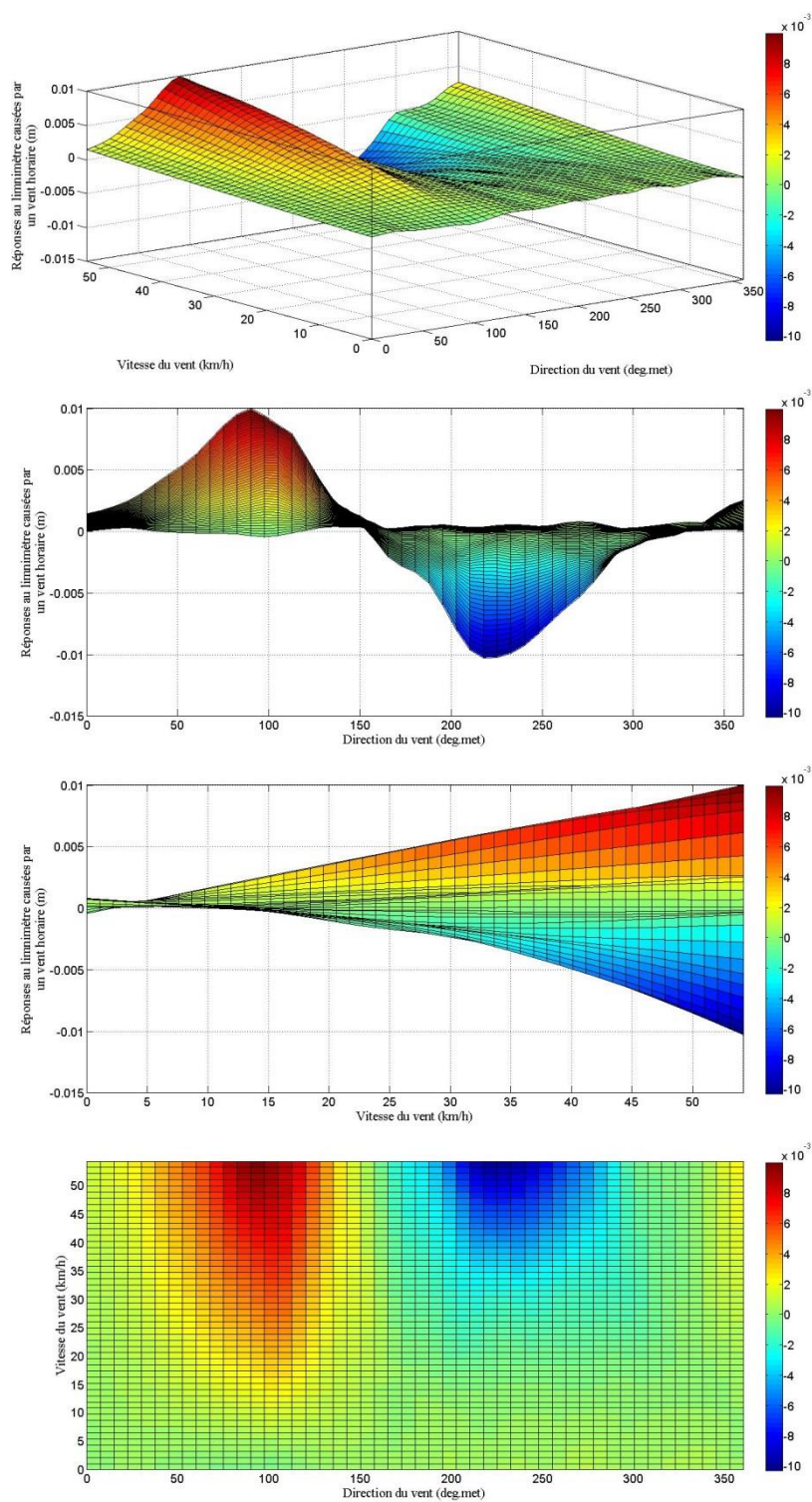


Figure 6-20 Régression non paramétrique de la réponse du limnimètre Sud-ouest du réservoir Gouin sous l'influence d'un vent horaire

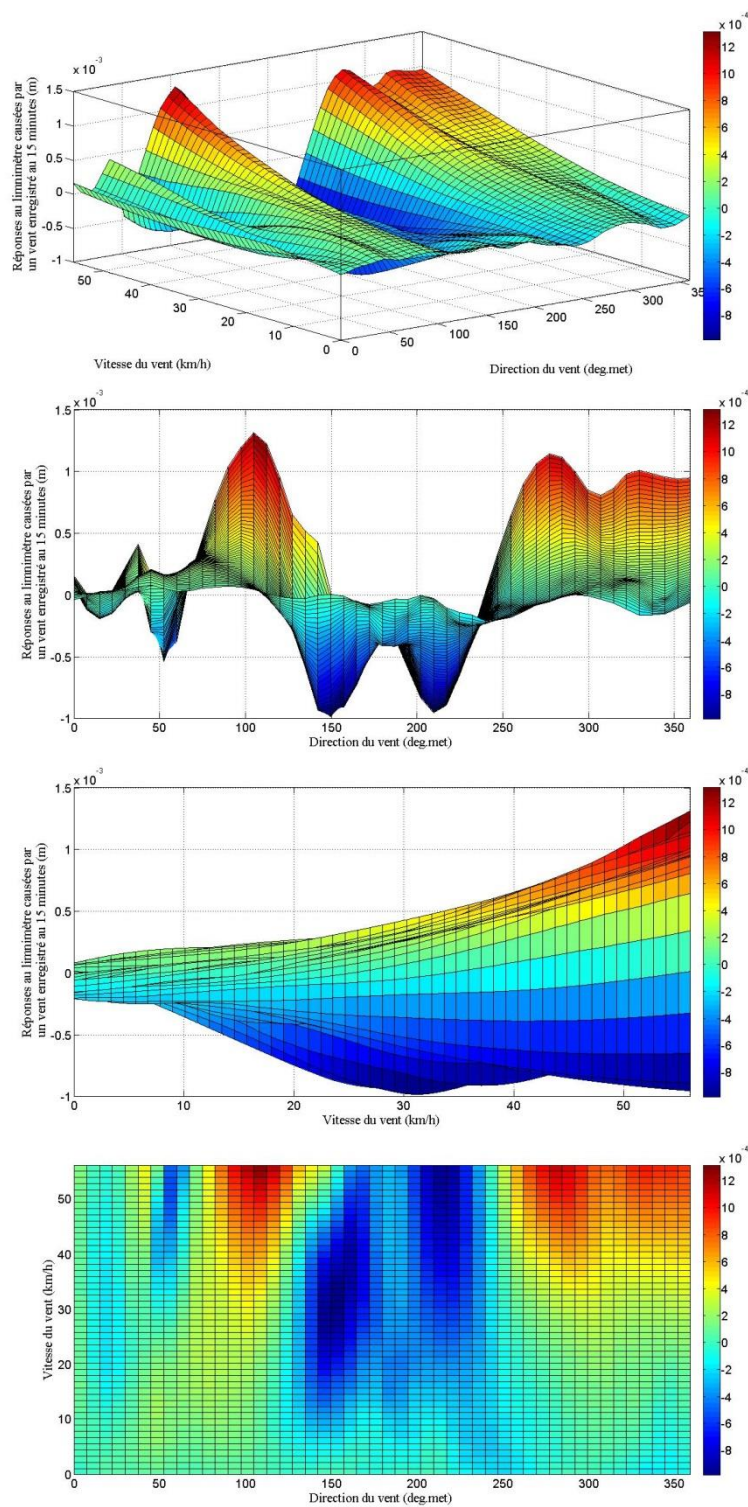


Figure 6-21 Régression non paramétrique de la réponse du limnimètre amont du réservoir  
Outardes 4 sous l'influence d'un vent enregistré aux 15 minutes

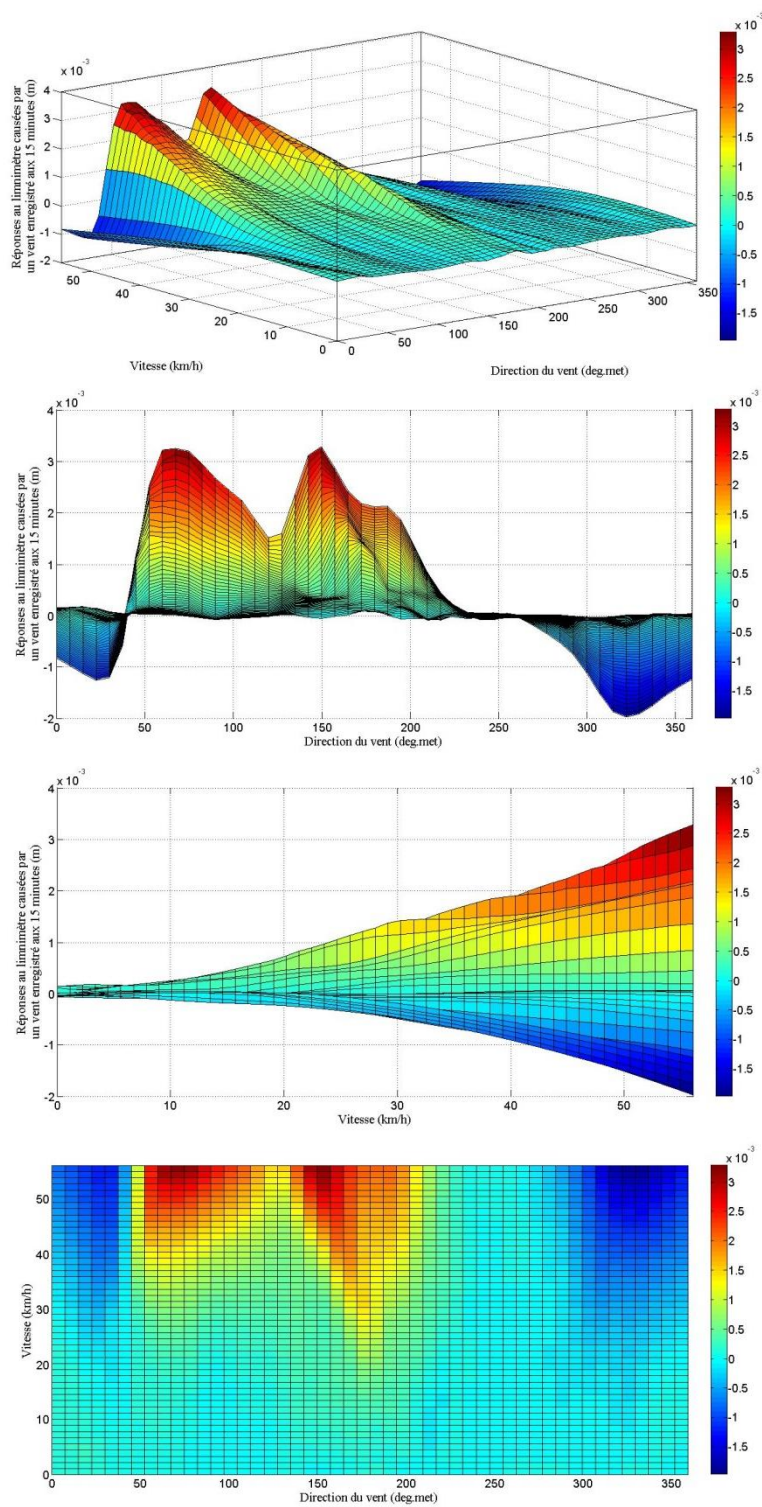


Figure 6-22 Régression non paramétrique de la réponse du limnimètre Nord du réservoir Outardes 4 sous l'influence d'un vent enregistré aux 15 minutes

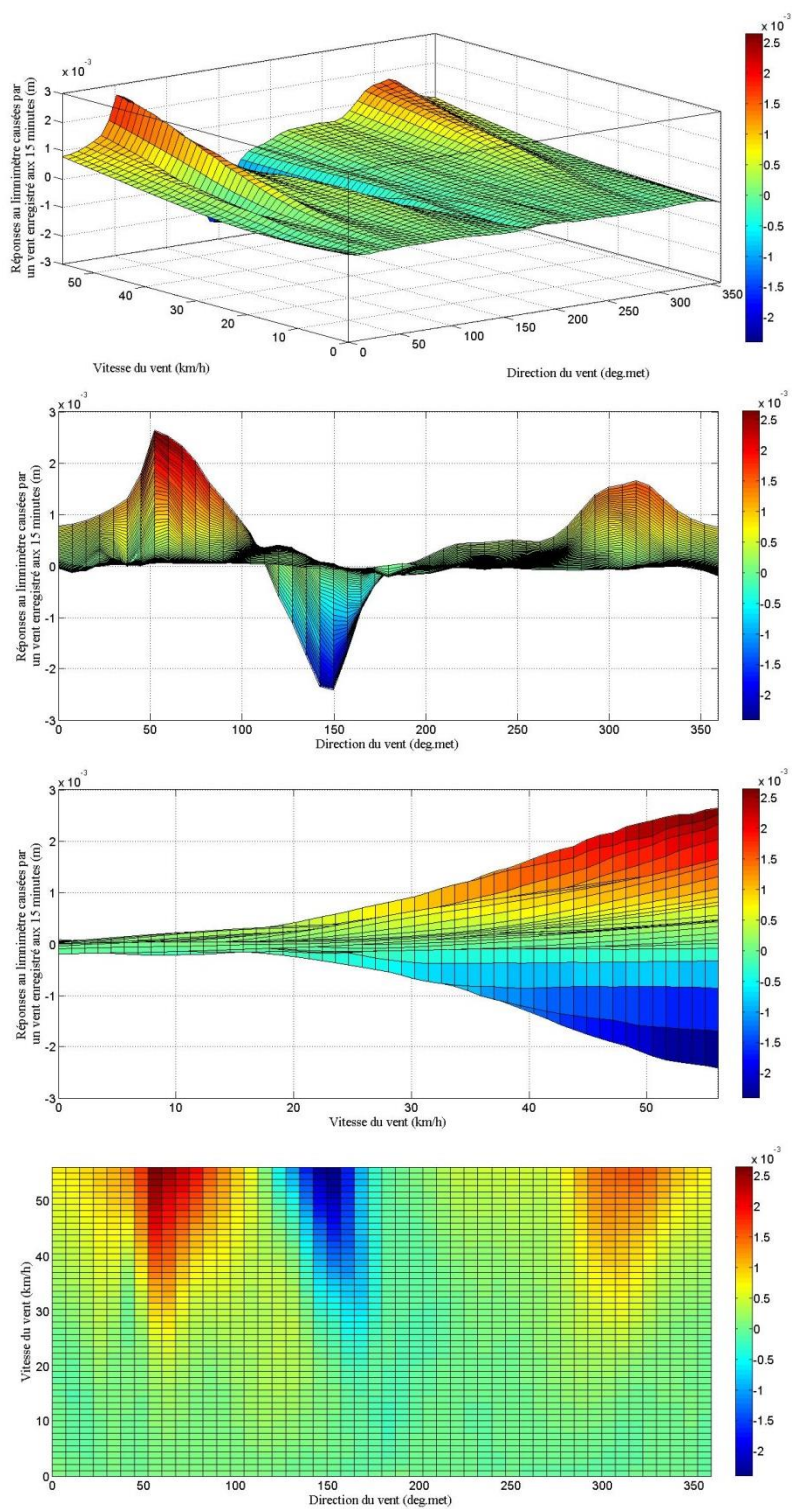


Figure 6-23 Régression non paramétrique de la réponse du limnimètre Sud du réservoir Outardes  
4 sous l'influence d'un vent enregistré aux 15 minutes

## **6.6 Conclusions et recommandations**

Dans le but de tenter de corriger les erreurs de l'effet du vent sur l'équation de bilan hydrique, il est nécessaire à priori de modéliser son effet sur les limnimètres. À cet effet, pour sa rapidité et sa simplicité à de mise en œuvre, la modélisation en écoulement permanent s'avère plus appropriée que la simulation en écoulement non permanent. Le Tableau 6-6 présente la comparaison des avantages/désavantages et les résultats obtenus par modélisation avec TELEMAC-2D aux états permanent et non permanent.

Tableau 6-6 Avantages et désavantages des différentes approches de modélisation par  
TELEMAC 2D

Approche de modélisation avec TELEMAC 2D	État non permanent	État permanent
Erreur d'apport maximale absolue estimée pour le mois de juillet 2012 à Gouin (m <sup>3</sup> /s)	340	134
Avantages	Prise en compte des seiches et de l'effet temporel du vent	Meilleure applicabilité en temps réel
Désavantages	Doit simuler en temps réel pour estimer l'incertitude d'apport	Prise en compte de la dénivellation due au vent seulement
		Sous-estimation majeure de l'incertitude d'apport
Constatations		Pour calculer l'incertitude d'apport, il est préférable d'utiliser les réponses plutôt que les différences de niveaux entre les limnimètres
		Possibilité d'approximer une position optimale pour l'ajout d'un nouveau limnimètre
		La prise en considération du niveau d'exploitation améliore la performance de modélisation

L'objectif principal de ce chapitre était d'expérimenter les différentes méthodes de modélisation à l'état permanent afin d'orienter une méthodologie de correction des effets de vent sur l'équation du bilan hydrique qui sera présentée ultérieurement au Chapitre 8.

Les éléments importants à retenir de ce chapitre sont les suivants :

- En considérant des conditions d'écoulement permanent, un coefficient de traînée de  $1.0 \cdot 10^{-3}$  donne les simulations les plus représentatives des observations pour la modélisation hydrodynamique à l'état permanent du réservoir Gouin (voir Tableau 6-1).
- La considération d'un niveau d'exploitation variable dans la modélisation hydrodynamique des différences de niveaux entre les limnimètres améliore modérément la performance des simulations pour le réservoir Gouin (voir Tableau 6-2)
- En considérant un coefficient de traînée de  $1.0 \cdot 10^{-3}$  en condition d'écoulement permanent, l'incertitude maximale d'apport naturel causée par le vent a été estimée à  $-134 \text{ m}^3/\text{s}$  pour les conditions de vent maximales journalières du mois de juillet 2012 au réservoir Gouin. Cette erreur survient dans les directions  $0^\circ$  et  $180^\circ$ . À ces directions de vent, les deux limnimètres varient dans le même sens ce qui amène une incertitude d'apport naturel qui ne peut être corrigée par les méthodes de combinaisons (voir Tableau 6-3).
- L'utilisation de la modélisation hydrodynamique a permis de constater que la formulation de différence de niveau entre les limnimètres n'est pas idéale pour étudier les incertitudes de l'effet du vent sur l'équation de bilan hydrique. À cet effet, il est préférable d'utiliser les réponses causées par le vent aux limnimètres.
- L'estimation de l'incertitude maximale d'apport naturel causée par le vent en condition d'écoulement permanent ( $-134 \text{ m}^3/\text{s}$ ) est de beaucoup inférieure à l'incertitude maximale d'apport estimée en condition d'écoulement non permanent au Chapitre 5 ( $-340 \text{ m}^3/\text{s}$ ) pour le réservoir Gouin. Ceci peut être expliqué par le fait que les incertitudes amenées par les forces inertielles du plan d'eau sont négligées en condition d'écoulement permanent. Si un modèle permanent était tout de même utilisé pour évaluer l'incertitude journalière du vent, il est recommandé d'évaluer l'incertitude en considérant le vent maximal observé durant la journée où le calcul de bilan hydrique est effectué.

- En analysant et en traitant les résultats de toutes les simulations de calibration à l'état permanent, il a été possible de déterminer le meilleur coefficient de traînée du vent en fonction de la vitesse et de la direction du vent (voir Tableau 6-4).
- Les régressions non paramétriques à une variable explicative effectuée par Haché et al. (2003) ont été mises à jour (voir Figure 6-12 et Figure 6-13). Malgré certaines divergences sur les bases de données intrants utilisées, les nouvelles relations non paramétriques sont très près de celles élaborées en 2003.
- Des relations non paramétriques à deux variables explicatives de la différence de niveau en fonction des caractéristiques du vent ont été effectuées par la méthode de LOWESS (Cleveland, 1979). Les résultats sont présentés de la Figure 6-14 à la Figure 6-17.
- Les performances de la modélisation des différences de niveau par modélisation hydrodynamique selon différentes formulations de coefficient de traînée et par régression non paramétrique sont comparées au Tableau 6-5. Il a été déterminé que la méthode la plus performante pour modéliser l'effet du vent à l'état permanent sur le réservoir Gouin est la régression non paramétrique à deux variables explicatives.
- À partir du Tableau 6-5, la considération du niveau d'exploitation jumelé à l'utilisation d'un coefficient de traînée du vent variable en fonction de la vitesse et la direction a donné la meilleure performance pour la modélisation hydrodynamique.
- Même si la modélisation hydrodynamique est moins performante que les méthodes par régression à l'état permanent, les résultats obtenus par cette méthode ont permis d'estimer un emplacement idéal pour installer un troisième limnimètre au réservoir Gouin (voir Figure 6-18). Cet emplacement minimise les réponses simulées combinées.
- Puisque la régression non paramétrique à deux variables explicatives est plus performante pour modéliser l'effet du vent et qu'il est préférable d'étudier les réponses causées par le vent aux limnimètres, des relations non paramétriques à deux variables explicatives ont été élaborées pour mettre en relation les réponses à un limnimètre et les caractéristiques du vent (voir la Figure 6-19 à la Figure 6-23). Les relations obtenues seront réutilisées au Chapitre 8 dans le but de corriger les effets de vents dans l'équation de bilan hydrique.

## CHAPITRE 7 MODÉLISATION DES MANŒUVRES HYDRAULIQUES

### 7.1 Introduction

Une manœuvre hydraulique peut être définie comme étant une ouverture/fermeture d'une vanne d'un évacuateur de crues ou d'un arrêt/démarrage d'un groupe turbine-alternateur. Une manœuvre hydraulique cause des fluctuations du niveau d'eau près du limnimètre en amont de la centrale hydroélectrique ou de l'évacuateur de crues. Ces fluctuations de niveau d'eau constituent un facteur humain qui influence l'équation de bilan hydrique. Il existe donc une incertitude d'apport naturel causée par les manœuvres qui peut survenir simultanément à une incertitude causée par l'effet du vent. Dans le but de corriger cette erreur dans l'équation du bilan hydrique, l'effet des manœuvres hydrauliques sur le limnimètre amont doit être modélisé. Puisque de longues séries de données de débits sortants et de niveaux d'eau sont disponibles, des méthodes de régressions seront expérimentées pour modéliser l'effet des manœuvres hydrauliques sur le limnimètre amont des réservoirs Gouin et Outardes 4. Plus précisément, la régression paramétrique et la régression non paramétrique seront utilisées pour mettre en relation les variations de niveau d'eau au limnimètre amont avec les variations de débit sortant de l'évacuateur de crues et/ou de la centrale hydroélectrique. Les relations obtenues seront utilisées ultérieurement au Chapitre 8 dans le but de corriger l'effet des manœuvres hydrauliques sur l'équation de bilan hydrique.

### 7.2 Méthodologie

Tout d'abord, il est nécessaire de formuler la variation du niveau d'eau amont et la variation de débit sortant :

$$dH_t = L_t - L_{t-1} \quad (7.1)$$

$$dQ_t = Q_{AV,t} - Q_{AV,t-1} \quad (7.2)$$

Où

- $L_t$  est le niveau d'eau mesuré par le limnimètre amont au temps  $t$
- $dH_t$  est la variation du niveau d'eau amont au temps  $t$

- $Q_{AV,t}$  est le débit sortant au temps  $t$  qui provient exclusivement soit de la centrale hydroélectrique (débit turbiné  $Q_T$ ) ou soit de l'évacuateur de crues (débit déversé  $Q_D$ )
- $dQ_t$  est la variation de débit sortant au temps  $t$

Ensuite, les équations (7.1), (7.2) sont calculées pour chaque donnée historique du Tableau 4-5.

Pour le réservoir Outardes 4, afin d'éviter d'inclure des données influencées par le vent dans les régressions, tous les  $dH_t$  et les  $dQ_t$  pour lesquels une vitesse de vent mesurée est supérieure à 1 km/h sont exclues.

Pour le réservoir Gouin, les  $dH_t$  et les  $dQ_t$  pour lesquels une vitesse de vent mesurée est supérieure à 20 km/h sont exclues. L'échantillon de données était trop petit en deçà de cette valeur parce qu'il y a peu de manœuvres hydrauliques au réservoir Gouin.

Ensuite, pour les deux réservoirs, toutes les données pour lesquelles une variation de débit sortant est inférieure à 20 m<sup>3</sup>/s ont été exclues. Il est donc considéré que toutes variations de moins de 20 m<sup>3</sup>/s ne causent aucune variation de niveau au limnimètre amont.

Une fois les échantillons de données choisis, une forme de régression paramétrique doit être sélectionnée. Après l'essai de différentes formes de régression, la forme suivante a été retenue :

$$dH = a * \exp(b * \log(dQ)) \quad (7.3)$$

Où

- $dH$  est la variation du niveau d'eau près du limnimètre amont
- $a$  et  $b$  sont des paramètres de régression
- $dQ$  est la variation du débit sortant à la centrale hydroélectrique ou à l'évacuateur de crues

Les observations pour lesquelles les  $dQ$  sont positifs sont ensuite séparées des observations pour lesquelles les  $dQ$  sont négatifs. Au total, 4 régressions sont effectuées par réservoir:

- Une régression paramétrique avec la forme de l'équation (7.3) pour les  $dQ$  positifs

- Une régression paramétrique avec la forme de l'équation (7.3) pour les  $dQ$  négatifs
- Une régression non paramétrique les  $dQ$  positifs
- Une régression non paramétrique les  $dQ$  négatifs

Finalement, pour les régressions non paramétriques, la méthode des splines lissantes (voir équation (2.14) section 2.3.7) est utilisée avec un paramètre de lissage de 0.8 pour Outardes 4 et 0.9 pour Gouin.

### 7.3 Résultats

Les relations paramétriques et non paramétriques des variations de niveau  $dH$  en fonction des variations de débit sortant  $dQ$  sont présentées à la Figure 7-1 et à la Figure 7-2. Pour les relations paramétriques, les intervalles de confiance 95% sont également présentés. Un  $dQ$  positif implique une ouverture de(s) vanne(s) pour le réservoir Gouin ou un démarrage de(s) groupe(s) pour Outardes 4 et vice versa.

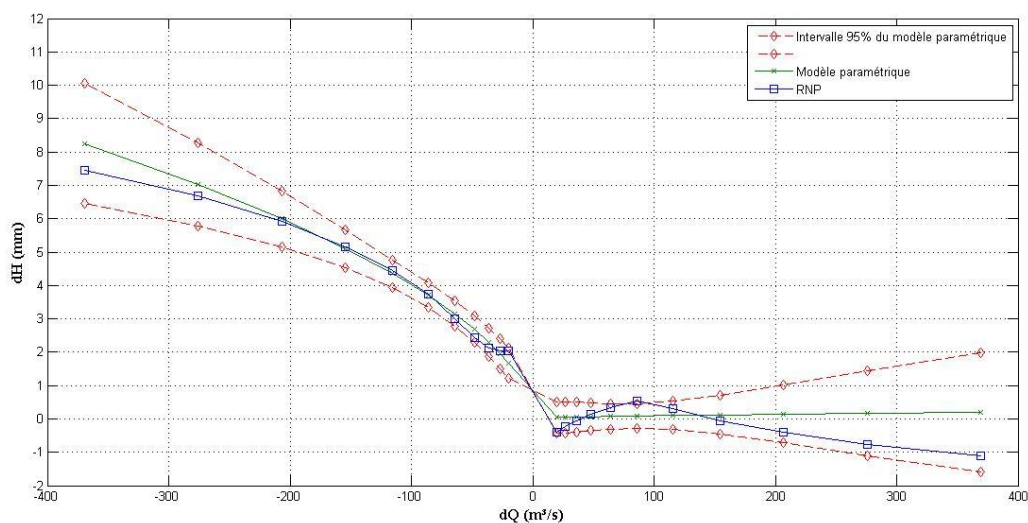


Figure 7-1 Modélisation de la réponse au limnimètre amont causée par les manœuvres hydrauliques de la centrale Outardes 4

Les relations paramétriques d'Outardes 4 s'expriment de la façon suivante :

Si  $dQ \geq 20 \text{ m}^3/\text{s}$

$$dH(\text{mm}) = -8.927 * 10^{-3} * \exp(0.5206 * \log(|dQ|)) \quad (7.4)$$

Si  $dQ \leq -20 \text{ m}^3/\text{s}$

$$dH(\text{mm}) = 0.3192 * \exp(0.5502 * \log(|dQ|)) \quad (7.5)$$

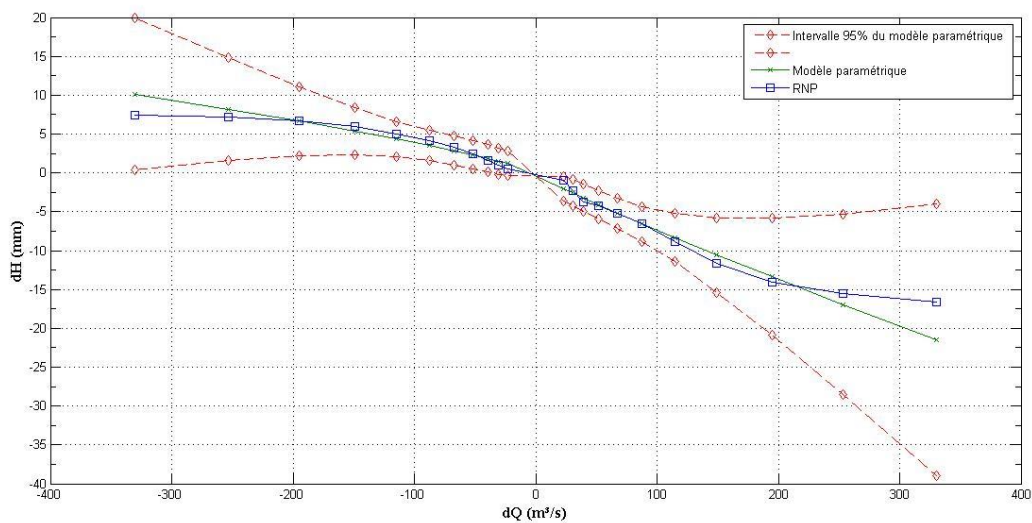


Figure 7-2 Modélisation de la réponse au limnimètre amont causée par les manœuvres hydrauliques de l'évacuateur de crues du réservoir Gouin

Les relations paramétriques de Gouin s'expriment de la façon suivante :

Si  $dQ \geq 20 \text{ m}^3/\text{s}$

$$dH \text{ (mm)} = -0.1211 * \exp(0.8925 * \log(|dQ|)) \quad (7.6)$$

Si  $dQ \leq -20 \text{ m}^3/\text{s}$

$$dH \text{ (mm)} = 0.1025 * \exp(0.7916 * \log(|dQ|)) \quad (7.7)$$

Pour Outardes 4 (Figure 7-1), on remarque que les démarrages de groupes ( $dQ$  positifs) n'ont aucun effet sur le niveau d'eau amont. Cependant, les arrêts de groupes peuvent influencer le niveau amont jusqu'à 6 à 10 mm pour un arrêt de plus de 300 m<sup>3</sup>/s. Le modèle non paramétrique est très près de la forme utilisée représentée par l'équation (7.3) ce qui confirme la robustesse de la forme paramétrique utilisée. On remarque cependant une anomalie du modèle non paramétrique aux alentours de 90 m<sup>3</sup>/s. L'augmentation du paramètre de filtrage aurait peut-être permis d'annuler cette anomalie.

Pour Gouin (Figure 7-2), une ouverture de vanne générant une variation de 300 m<sup>3</sup>/s peut provoquer une variation du niveau amont de -5 à -40 mm. Pour une fermeture de -300 m<sup>3</sup>/s, la variation du niveau amont s'étale de 0 à 20 mm.

À partir des résultats, on remarque que pour les deux réservoirs, une ouverture/démarrage de vanne/groupe entraîne une variation négative du niveau amont alors qu'une fermeture/arrêt de vanne/groupe entraîne une variation positive du niveau amont. Les résultats vont donc dans le même sens que le concept d'onde de translation illustré à la Figure 2-9. Les expressions (7.4), (7.5), (7.6) et (7.7) seront réutilisées au Chapitre 8 dans une procédure visant à corriger les effets des manœuvres hydrauliques dans l'équation de bilan hydrique.

## **CHAPITRE 8    CORRECTION DE L'EFFET DE VENT ET DES MANŒUVRES HYDRAULIQUES SUR L'ÉQUATION DU BILAN HYDRIQUE**

### **8.1 Introduction**

Le calcul d'apport naturel par l'équation de bilan hydrique est assujéti à plusieurs sources d'incertitudes. Jusqu'à présent, dans ce rapport, les sources d'incertitudes de l'effet de vent et des manœuvres hydrauliques ont été estimées à l'aide de différentes techniques de modélisation. À partir des résultats obtenus par la modélisation, l'objectif de ce chapitre est d'élaborer une nouvelle méthodologie pour réduire l'impact des incertitudes de l'effet de vent et des manœuvres hydrauliques sur l'équation de bilan hydrique à l'échelle journalière. Afin d'évaluer et de comparer la performance de la nouvelle méthode, certaines méthodes de combinaisons provenant de la littérature (voir section 2.5.2) seront expérimentées.

Plus précisément, au courant de ce chapitre, une analyse de sensibilité sur le choix du pas de temps de l'équation du bilan hydrique sera effectuée. Ensuite, les méthodes de combinaisons suivantes seront expérimentées pour les réservoirs Outardes 4 et Gouin : pondération par moyenne arithmétique, pondération par inverse de la distance, pondération par la méthode de Thiessen, pondération minimisant l'écart type du niveau combiné et l'algorithme du niveau virtuel. Finalement, la nouvelle méthode de pondération sera expérimentée et comparée aux méthodes de combinaison existantes.

### **8.2 Pas de temps du bilan hydrique**

La méthode la plus simple pour réduire l'incertitude de l'effet de vent et des manœuvres hydrauliques sur le calcul d'apport naturel est d'augmenter le pas de temps de l'équation du bilan hydrique (voir section 2.5.1). Bien que l'objet de ce chapitre concerne la réduction de l'incertitude causée par l'effet de vent/manœuvres sur l'équation de bilan hydrique à l'échelle journalière, il peut être intéressant d'observer comment ces incertitudes se comportent selon différents choix de pas de temps. Pour ce faire, les patrons d'erreur estimés en écoulement non permanent présentés à la Figure 5-15 et à la Figure 5-28 seront réutilisés. Ces patrons d'erreur ont été calculés par bilan hydrique avec la méthode de combinaison par pondération arithmétique

selon un pas de temps journalier. Toutefois, au lieu de calculer l'erreur d'apport naturel avec un pas de temps journalier, différents pas de temps supérieurs à une journée ont été expérimentés. Pour le réservoir Gouin pendant le mois de juillet 2012, l'erreur maximale d'apport naturel selon différents pas de temps de l'équation de bilan hydrique est présentée à la Figure 8-1. Pour le réservoir Outardes 4 pendant le mois d'octobre 2010, l'erreur maximale d'apport naturel selon différents pas de temps de l'équation de bilan hydrique est présentée à la Figure 8-2.

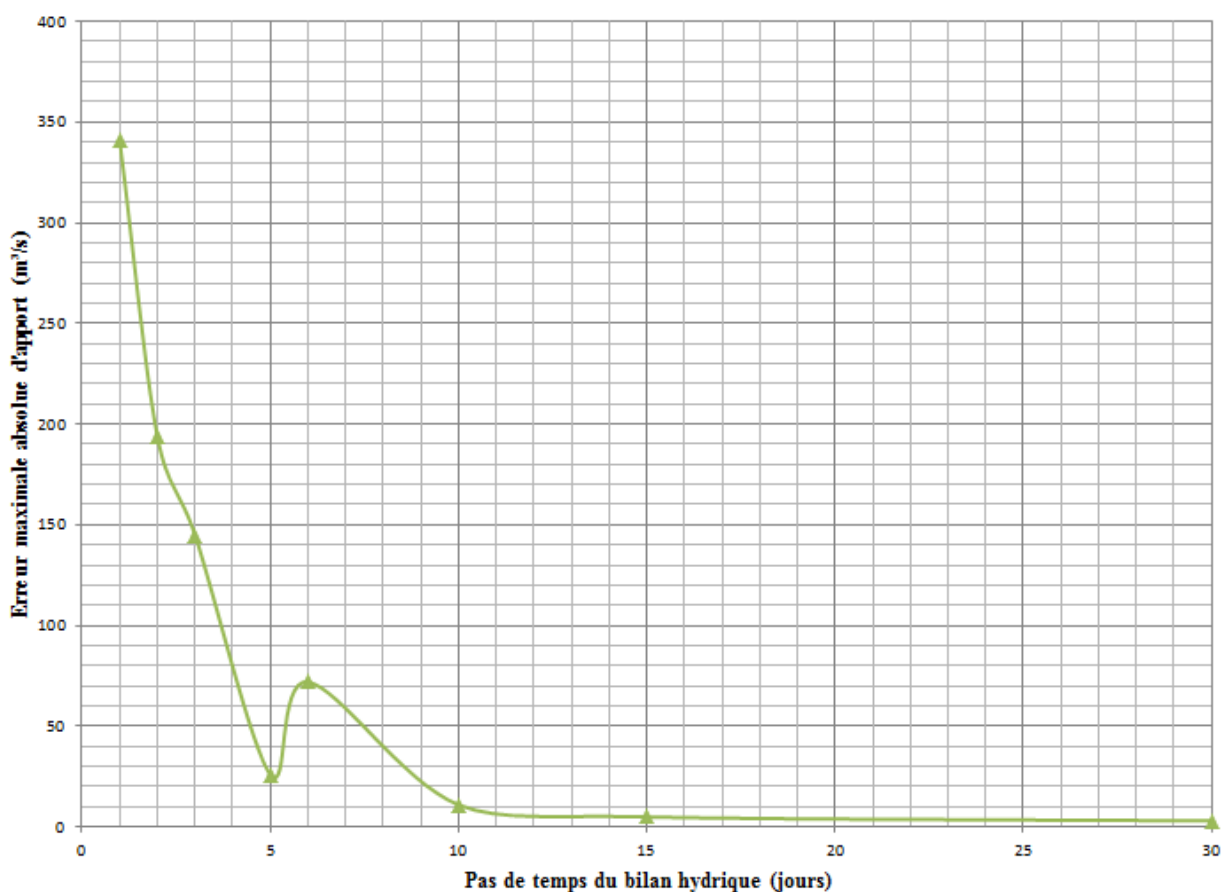


Figure 8-1 Erreur maximale d'apport naturel selon différents pas de temps du bilan hydrique pour le réservoir Gouin durant le mois de juillet 2012

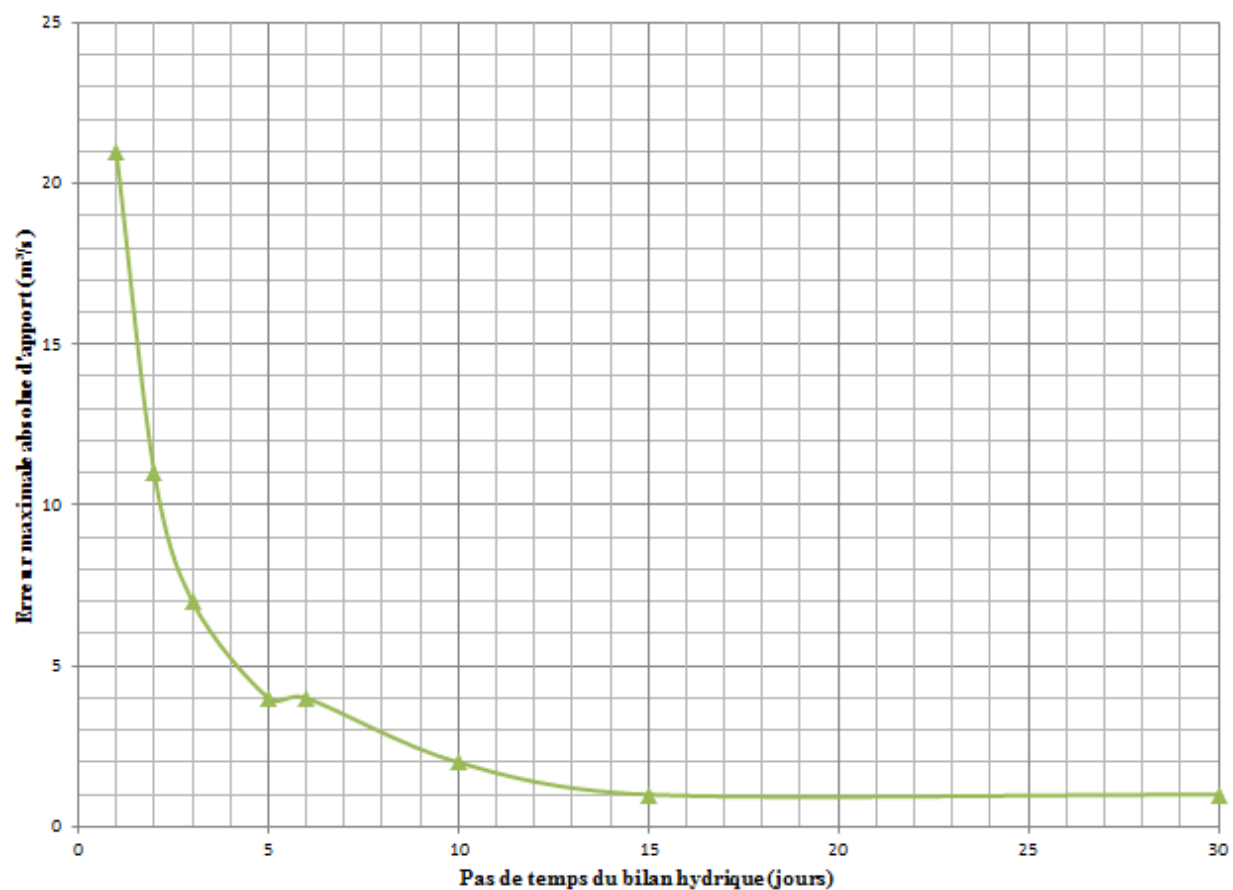


Figure 8-2 Erreur maximale d'apport naturel selon différents pas de temps du bilan hydrique pour le réservoir Outardes 4 durant le mois d'octobre 2010

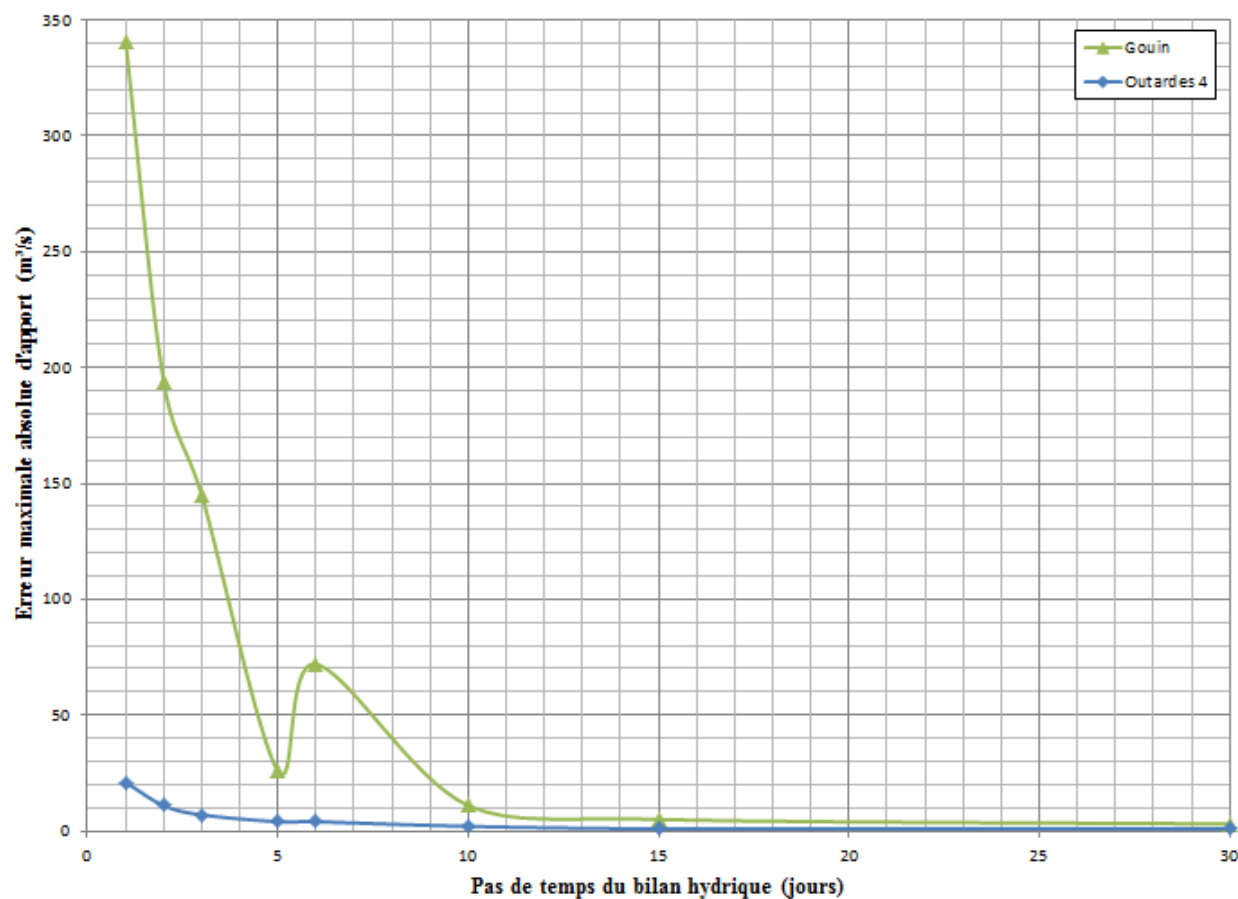


Figure 8-3 Comparaison de l'erreur maximale absolue d'apport naturel entre les réservoirs Gouin et Outardes 4

On peut observer à la Figure 8-1 et à la Figure 8-2 que l'erreur d'apport causée par l'effet du vent diminue au fur et à mesure que le pas de temps du bilan hydrique augmente entre 1 jour et 15 jours. Le pas de temps de 15 jours constitue un point d'inflexion. Au-delà de ce pas de temps, une erreur résiduelle de quelques  $\text{m}^3/\text{s}$  persiste. Il n'y a donc aucun gain à utiliser un pas de temps supérieur à 15 jours pour éliminer les effets du vent dans le calcul d'apport naturel. Cependant, pour Outardes 4, il y a très peu de différence entre le pas de temps de 10 jours et 15 jours. Le pas de temps optimal pour Outardes 4 se situe donc entre 10 et 15 jours. Toutefois, l'utilisation d'un pas de temps de plus d'un jour dans l'équation de bilan hydrique n'est pas appropriée pour la prévision des apports journaliers. Afin de réduire les effets de vent et des manœuvres à une fenêtre de temps journalière, il est préférable d'envisager l'utilisation de différentes méthodes de combinaison.

### 8.3 Méthodes de combinaison

Les méthodes de combinaison consistent à attribuer une pondération à chaque limnimètre lors du calcul du niveau combiné (voir équation (2.5)). Il existe des méthodes de combinaison par pondération fixe ou par pondération variable comme l'algorithme du niveau virtuel. Actuellement, Hydro-Québec utilise pour chacun de ses réservoirs une pondération arithmétique fixe. Il a été déterminé par différents auteurs (Haché et al., 2003), (Zervas, 1997) (Croley, 1987) que le choix de la méthode de combinaison a une importance particulière sur l'ampleur de l'incertitude de l'effet de vent/manœuvres qui est induite dans l'équation de bilan hydrique. L'objectif de cette section est d'expérimenter et de comparer les différentes méthodes de combinaison existantes pour les réservoirs Gouin et Outardes 4. Les pondérations associées à chacune de ces méthodes sont présentées au Tableau 8-1.

Tableau 8-1 Facteur de pondération des limnimètres pour différentes méthode de combinaison pour les réservoirs Outardes 4 et Gouin

Réservoir	Méthode de combinaison	Limnimètre	Caractéristiques du réseau de jauges limnimétriques		Facteur de pondération	Apport moyen (m³/s)	Écart par rapport à la moyenne arithmétique
			Distance au centre de masse (km)	Surface du polygone de Thiessen (km²)			
Outardes 4	Moyenne arithmétique	Nord	---	---	0.333	521	0%
		Sud	---	---	0.333		
		Centrale	---	---	0.333		
	Méthode de Thiessen	Nord	---	133	0.185	490	6%
		Sud	---	456	0.635		
		Centrale	---	130	0.180		
	Inverse de la distance	Nord	47.9	---	0.154	495	5%
		Sud	10.6	---	0.693		
		Centrale	48.3	---	0.153		
	Écart-type des $\Delta N_c$ minimisé	Nord	---	---	0.376	447	14%
		Sud	---	---	0.622		
		Centrale	---	---	0.002		
Gouin	Moyenne arithmétique	Sud-ouest	---	---	0.500	47	0%
		Amont	---	---	0.500		
	Méthode de Thiessen *	Sud-ouest	---	N/A *	N/A *	N/A *	N/A *
		Amont	---	N/A *	N/A *		
	Inverse de la distance	Sud-ouest	39.5	---	0.588	46	1%
		Amont	56.5	---	0.412		
	Écart-type des $\Delta N_c$ minimisé	Sud-ouest	---	---	0.663	43	7%
		Amont	---	---	0.337		

**Légende :**

Méthode écartée car l'écart par rapport à la moyenne arithmétique est > 10%

\* Méthode non applicable car moins de 3 limnimètres

Le Tableau 8-1 présente les facteurs de pondération pour 4 méthodes de combinaison fixes différentes avec l'apport moyen calculé pour toutes les données disponibles à l'intérieur de la plage entre les mois de mai et d'octobre. La méthode de l'écart-type des  $\Delta N_c$  minimisé consiste à trouver un jeu de facteurs de pondération fixes pour l'historique des niveaux d'eau qui minimise l'objectif suivant:

$$MIN \sqrt{\sum_{t=2}^n \frac{1}{n} (N_{c,t} - N_{c,t-1})^2} \quad (8.1)$$

Où

- $n$  est la taille de l'échantillon des niveaux d'eau
- $N_{c,t}$  est le niveau combiné calculé à partir des facteurs de pondération à l'instant  $t$

À partir du Tableau 8-1, il est possible de constater que l'apport moyen calculé avec les pondérations obtenues par l'application de l'équation (8.1) s'écarte substantiellement de celui calculé par la méthode qu'Hydro-Québec utilise (moyenne arithmétique). Pour cette raison, la méthode de l'écart-type des  $\Delta N_c$  minimisé a été écartée pour le réservoir Outardes 4.

Ensuite, afin de déterminer la méthode de combinaison la plus appropriée pour chaque réservoir, les indicateurs de performance suivants ont été calculés pour chaque méthode :

1. L'écart type des variations d'apport naturel (voir Tableau 2-1)
2. La somme des fluctuations négatives d'apports naturels

Ces indicateurs de performance sont présentés selon les différentes années de données disponibles au Tableau 8-2 pour Outardes 4 et au Tableau 8-3 pour Gouin.

Tableau 8-2 Comparaison de la performance de différentes méthodes de combinaison pour le  
réservoir Outardes 4

Année	Écart type des $\Delta An$ (m <sup>3</sup> /s) *				Somme des fluctuations négatives (m <sup>3</sup> /s) *			
	Pondération fixe			Pondération variable	Pondération fixe			Pondération variable
	Arithmétique	Inverse de la distance	Thiessen	Algorithme du niveau virtuel	Arithmétique	Inverse de la distance	Thiessen	Algorithme du niveau virtuel
2005	<b>69</b>	78	76	<b>63</b>	<b>0</b>	-35	-3	0
2006	<b>80</b>	95	99	98	-17	<b>0</b>	0	0
2007	77	84	<b>71</b>	74	<b>0</b>	0	0	0
2008	<b>112</b>	113	155	156	<b>0</b>	0	0	0
2009	<b>57</b>	61	59	62	<b>0</b>	0	0	0
2010	58	<b>56</b>	58	57	<b>0</b>	0	0	0
2011	<b>66</b>	74	74	<b>62</b>	<b>0</b>	0	0	0
2012	71	<b>70</b>	72	76	<b>0</b>	0	0	0
<b>Moyenne</b>	<b>74</b>	79	83	81	-2	-4	<b>0</b>	0

**Légende :**

\* Plus la valeur de l'indicateur est près de 0, meilleure est la performance de la méthode de combinaison

**Meilleure méthode de combinaison par pondération fixe**

**Meilleure méthode de combinaison**

Tableau 8-3 Comparaison de la performance de différentes méthodes de combinaison pour le  
réservoir Gouin

Année	Écart type des $\Delta An$ (m <sup>3</sup> /s)				Somme des fluctuations négatives (m <sup>3</sup> /s)			
	Pondération fixe			Pondération variable	Pondération fixe			Pondération variable
	Arithmétique	Inverse de la distance	Pondération optimisée sur l'écart type des $\Delta An$	Algorithme du niveau virtuel	Arithmétique	Inverse de la distance	Pondération optimisée sur l'écart type des $\Delta An$	Algorithme du niveau virtuel
2007	324	313	<b>311</b>	<b>306</b>	<b>-2.48E+04</b>	-2.48E+04	-2.51E+04	<b>-2.01E+04</b>
2008	320	<b>296</b>	297	<b>268</b>	-1.65E+04	-1.56E+04	<b>-1.52E+04</b>	<b>-1.35E+04</b>
2009	335	292	<b>268</b>	<b>243</b>	-2.26E+04	-2.14E+04	<b>-2.04E+04</b>	<b>-1.82E+04</b>
2010	264	233	<b>216</b>	<b>167</b>	-2.07E+04	-1.88E+04	<b>-1.79E+04</b>	<b>-1.72E+04</b>
2011	259	220	<b>208</b>	<b>190</b>	-1.62E+04	-1.47E+04	<b>-1.42E+04</b>	<b>-1.23E+04</b>
2012	288	251	<b>227</b>	<b>184</b>	-1.84E+04	-1.70E+04	<b>-1.63E+04</b>	<b>-1.42E+04</b>
<b>Moyenne</b>	298	267	<b>255</b>	<b>226</b>	-1.99E+04	-1.87E+04	<b>-1.82E+04</b>	<b>-1.59E+04</b>

**Légende :**

\* Plus la valeur de l'indicateur est près de 0, meilleure est la performance de la méthode de combinaison

**Meilleure méthode de combinaison par pondération fixe**

**Meilleure méthode de combinaison**

On peut observer au Tableau 8-2 et au Tableau 8-3 que l'écart-type des  $\Delta An$  est beaucoup plus faible à Outardes 4 qu'à Gouin. Cela se traduit par un signal beaucoup plus bruité à Gouin qu'à Outardes 4 tel que l'on peut le visualiser à la Figure 4-5 et à la Figure 4-6. Pour ce qui est de la somme des fluctuations négatives, on peut observer au Tableau 8-2 qu'il n'y a pratiquement

aucune valeur d'apport naturel négative à Outardes 4 contrairement au réservoir Gouin. Cet indicateur n'est donc pas très adapté pour Outardes 4.

Ensuite, toujours pour Outardes 4, on peut constater au Tableau 8-2 que la meilleure méthode à pondération fixe est la moyenne arithmétique. La pondération de chaque instrument pour cette méthode est de 1/3. Dans ces conditions, l'écart-type moyen des  $\Delta A_n$  est de 74 m<sup>3</sup>/s ce qui est bien meilleur que pour la pondération variable avec 81 m<sup>3</sup>/s. La méthode de l'algorithme virtuel pour les pondérations variables dans le temps est beaucoup moins performante que les méthodes simples à pondération fixes. Pour Outardes 4, Hydro-Québec utilise donc la méthode de combinaison qui donne les apports naturels les moins bruités.

Pour le réservoir Gouin, on peut constater au Tableau 8-3 que la meilleure pondération fixe est celle qui est optimisée pour minimiser l'écart-type des  $\Delta N_c$ . Avec cette méthode, l'écart-type moyen des  $\Delta A_n$  est de 255 m<sup>3</sup>/s. De plus, contrairement au réservoir Outardes 4, la méthode de l'algorithme virtuel fournit la meilleure performance avec un écart-type moyen des  $\Delta A_n$  de 226 m<sup>3</sup>/s. Cette méthode à pondération variable a également donné une plus petite moyenne de la somme des valeurs négatives (-15900 m<sup>3</sup>/s) que la meilleure méthode à pondération fixe (-18200 m<sup>3</sup>/s). En utilisant une méthode de pondération autre que la moyenne arithmétique, il serait possible pour Hydro-Québec d'améliorer la qualité du signal d'apport au réservoir Gouin.

## 8.4 Élaboration d'une nouvelle méthode de combinaison

L'objectif de cette section est de présenter une nouvelle méthode de combinaison qui est fonction de la meilleure méthode de combinaison à pondération fixe déterminée à la section 8.3 ainsi que des résultats des modélisations de l'effet du vent et des manœuvres hydrauliques. Les réponses modélisées aux limnimètres causées par l'effet du vent présentées de la Figure 6-19 à la Figure 6-23 ainsi que les fluctuations modélisées du niveau d'eau causées par les manœuvres hydrauliques présentées à la Figure 7-1 et à la Figure 7-2 sont utilisées afin de guider une méthode de combinaison à pondération variable. En d'autres mots, lorsqu'il n'y a pas de vent et pas de manœuvres hydrauliques, les pondérations des limnimètres sont initialisées à la meilleure pondération fixe déterminée à la section 8.3. Cependant, lorsqu'il y a du vent/manœuvres, les pondérations des limnimètres sont ajustées avec l'objectif que les réponses simulées du vent et

des manœuvres s'annulent entre elles. On cherche donc à trouver un jeu de facteurs de pondération qui minimise la réponse simulée combinée.

Ensuite, lorsque l'épisode de vent/manœuvre se termine, les facteurs de pondération sont réinitialisés aux valeurs de la meilleure pondération fixe. De plus, en période de vent/manœuvre, seulement les pondérations des limnimètres sont modifiées; il n'y a donc pas de chance de contaminer l'équation de bilan hydrique par des erreurs externes provenant de la modélisation.

La procédure générale de la nouvelle méthode de combinaison est la suivante :

### **1. Initialisation des pondérations à la meilleure méthode de combinaison fixe pour chaque réservoir**

Pour le réservoir Outardes 4, les pondérations sont initialisées selon la moyenne arithmétique à 1/3 pour chaque instrument. Pour le réservoir Gouin, les pondérations sont initialisées à 0.663 pour le limnimètre Sud-ouest et à 0.337 pour le limnimètre amont.

### **2. Estimation de la fluctuation du niveau amont causée par une manœuvre hydraulique à minuit**

À partir du débit turbiné/déversé observé (voir Tableau 4-5), les équations (7.4), (7.5), (7.6) et (7.7) sont utilisées pour estimer la variation du niveau d'eau près du limnimètre amont  $dH$ .

### **3. Estimation des réponses du vent aux limnimètres**

Les relations présentées de la Figure 6-19 à la Figure 6-23 sont évaluées pour chaque donnée de vitesse/direction du vent horaire (voir Tableau 4-7). En évaluant chacune des relations, les réponses du vent à chaque limnimètre sont obtenues pour la journée en cours.

### **4. Détermination de l'épisode de vent le plus critique durant la journée en cours**

Lors du calcul d'apport naturel journalier, seulement les niveaux à minuit sont retenus pour être utilisés dans l'équation de bilan hydrique. De ce fait, l'utilisation d'un vent moyen journalier pourrait sous-estimer l'erreur d'apport s'il y avait par exemple une bourrasque de vent quelques heures avant minuit. Afin de prendre en considération que la vitesse et la direction du vent peuvent varier brusquement au courant d'une journée, l'épisode de vent le plus critique au cours de la journée doit être identifié. À partir de minuit et en reculant dans le temps par

intervalle d'une heure jusqu'au début de la journée, les réponses du vent évaluées à l'étape 3 sont additionnées et combinées selon la meilleure méthode de pondération fixe. La réponse combinée maximale obtenue en balayant toutes les heures de la journée constitue l'épisode de vent le plus critique. Plus précisément, la recherche de l'épisode de vent critique correspond à la résolution de l'équation suivante :

$$R_{c,cr,t} = MAX \left| \left\{ \sum_{h=24}^{h-1} R_{c,h} , \sum_{h=24}^{h-2} R_{c,h} , \dots \sum_{h=24}^0 R_{c,h} \right\} \right| \quad (8.2)$$

$$R_{c,h} = \left( \sum_{i=1}^{n-1} w_{i,fixe} R_{i,h} + w_{amont,fixe} (R_{amont,h} + dH) \right) \quad (8.3)$$

$$R_{c,cr,t} = \left| \left( \sum_{i=1}^{n-1} w_{i,fixe} R_{i,cr,t} + w_{amont,fixe} (R_{amont,cr,t} + dH) \right) \right| \quad (8.4)$$

Où

- $R_{c,cr,t}$  est la réponse combinée critique pour la journée  $t$
- $R_{c,h}$  est la réponse combinée à l'heure  $h$
- $n$  est le nombre de limnimètres sur le réservoir
- $i$  correspond à chaque limnimètre installé sur le réservoir en excluant le limnimètre en amont d'une centrale hydroélectrique ou d'un évacuateur de crues
- $R_{i,h}$  est la réponse causée par le vent au limnimètre  $i$ . Cette réponse est obtenue en évaluant les relations présentées de la Figure 6-19 à la Figure 6-23 à la vitesse et à la direction de vent qui ont été enregistrées durant l'heure  $h$
- $R_{amont,h}$  est la réponse causée par le vent au limnimètre amont du réservoir étudié. Cette réponse est obtenue en évaluant les relations présentées à la Figure 6-19 ou à la Figure 6-21 à la vitesse et à la direction de vent qui ont été enregistrées durant l'heure  $h$
- $dH$  est l'estimation de la fluctuation du niveau amont causée par une manœuvre hydraulique entre 23 heures PM et minuit. Cette valeur est obtenue en calculant les

équations (7.4), (7.5), (7.6) et (7.7) à partir de la variation de débit sortant  $dQ$  entre 23 heures PM et minuit.

- $R_{i,cr,t}$  sont les réponses associées à l'épisode de vent critique pour les limnimètres  $i$  durant la journée  $t$
- $R_{amont,cr,t}$  est la réponse associée à l'épisode de vent critique au limnimètre amont pour la journée  $t$
- $w_{i,fixe}$  est la meilleure pondération fixe des limnimètres  $i$  déterminée à la section 8.3
- $w_{amont,fixe}$  est la meilleure pondération fixe du limnimètre amont déterminée à la section 8.3

## 5. Calcul des bornes permises pour les pondérations des limnimètres

Tel que discuté précédemment, lorsqu'il n'y a pas de vent ni de manœuvre, les pondérations sont fixes. Lors d'un épisode de vent/manœuvre durant la journée, les pondérations deviennent variables dans le temps. En fait, il est permis pour chaque pondération de limnimètre de varier à l'intérieur d'une plage bien définie. Cette plage est constituée d'une borne inférieure et d'une borne supérieure. Plus l'effet du vent et des manœuvres est important, plus l'écart entre la borne inférieure et la borne supérieure est élevé et vice versa. Les bornes de pondération sont calculées en minimisant l'équation (8.3) en considérant des pondérations variables au lieu de pondérations fixes. Les pondérations doivent être strictement positives et leur somme doit être égale à 1. Au final, la Figure 8-4 présente le résultat du calcul de la plage permise pour le limnimètre amont du réservoir Outardes 4.

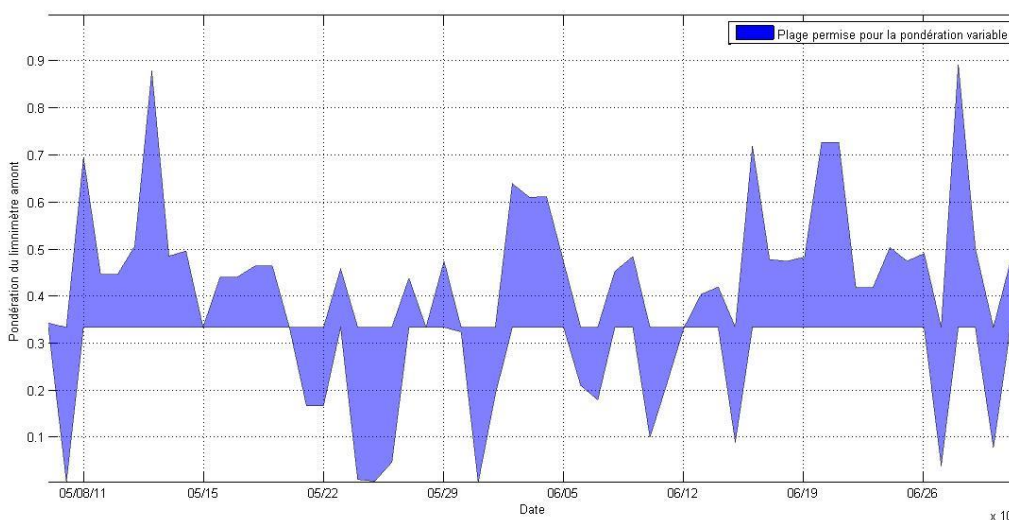


Figure 8-4 Plage permise pour la pondération variable du limnimètre amont du réservoir Outardes 4 entre les mois de mai et juin

## 6. Calcul de la pondération variable optimale

Le calcul de la pondération variable optimale est l'étape qui permet de déterminer la meilleure pondération variable à chaque limnimètre pour minimiser du mieux possible les erreurs des effets de vent et de manœuvres hydrauliques. La pondération variable optimale est recherchée à l'intérieur des plages permises illustrées à la Figure 8-4. La recherche de cette pondération optimale est effectuée en résolvant le problème d'optimisation suivant :

$$R_{c,min} = MIN \left| w_{amont}(\Delta R_{amont} + \Delta dH) + \sum_{i=1}^{n-1} w_i \Delta R_i \right| \quad (8.5)$$

Contraint à

$$w_{amont} + \sum_{i=1}^{n-1} w_i = 1 \quad (8.6)$$

$$w_{borne\ inf,i} \leq w_i \leq w_{borne\ sup,i} \quad (8.7)$$

$$w_{borne\ inf,amont} \leq w_{amont} \leq w_{borne\ sup,amont} \quad (8.8)$$

$$(N_{cm,t} - N_{cm,t-1}) \leq (N_{c,t} - N_{c,t-1}) \quad (8.9)$$

Où

- $R_{c,min}$  est la réponse combinée minimisée
- $w_{amont}$  est la pondération variable optimale pour le limnimètre amont
- $w_i$  sont les pondérations variables optimales pour les limnimètres  $i$
- $w_{borne\ inf,i}$  et  $w_{borne\ sup,i}$  sont les bornes de la plage permise telles qu'illustrées à la Figure 8-4
- $\Delta R_i = R_{i,cr,t} - R_{i,cr,t-1}$
- $\Delta R_{amont} = R_{amont,cr,t} - R_{amont,cr,t-1}$
- $N_{cm,t}$  est le niveau combiné calculé avec  $w_{amont}$  et  $w_i$
- $N_{c,t}$  est le niveau combiné calculé avec les meilleures pondérations fixes

La contrainte présentée à l'équation (8.9) assure que le gradient du niveau combiné avec les pondérations variables optimales est inférieur au gradient du niveau combiné aux meilleures pondérations fixes. Cette contrainte permet d'assurer que les fluctuations dans les apports naturels sont réduites au même moment que la réponse combinée est minimisée. Dans le cas où cette contrainte ne peut être satisfaite, les meilleures pondérations fixes sont utilisées par défaut.

Cette méthode de combinaison en 6 étapes a été appliquée à l'ensemble des données historiques du Tableau 4-5 afin de recalculer les apports naturels avec des pondérations variables optimales. Les apports obtenus par cette méthode de combinaison sont comparés aux apports filtrés de la base de données SPAN et aux apports calculés par les meilleures pondérations fixes. Les résultats sont présentés de la Figure 8-5 à la Figure 7-10. Dans ces figures, les trois premières fenêtres de visualisation correspondent aux données observées du vent et des niveaux d'eau. La quatrième fenêtre correspond aux pondérations variables optimales. La cinquième fenêtre correspond à la valeur obtenue pour  $R_{c,min}$  qui constitue la fonction objective à l'équation (8.5). Finalement, la sixième fenêtre de visualisation compare les différentes séries d'apports obtenues.

Ensuite, chaque fois que la variable  $\Delta dH$  correspond à au moins 10 % de la réponse combinée  $R_{c,cr,t}$ , un marqueur circulaire a été inclus sur la nouvelle série d'apports pour indiquer une correction d'un effet de manœuvre. Il n'y a pas de marqueur sur les séries d'apports corrigées du réservoir Gouin puisqu'il n'y a pratiquement aucune manœuvre qui a été effectuée à minuit dans les données historiques disponibles.

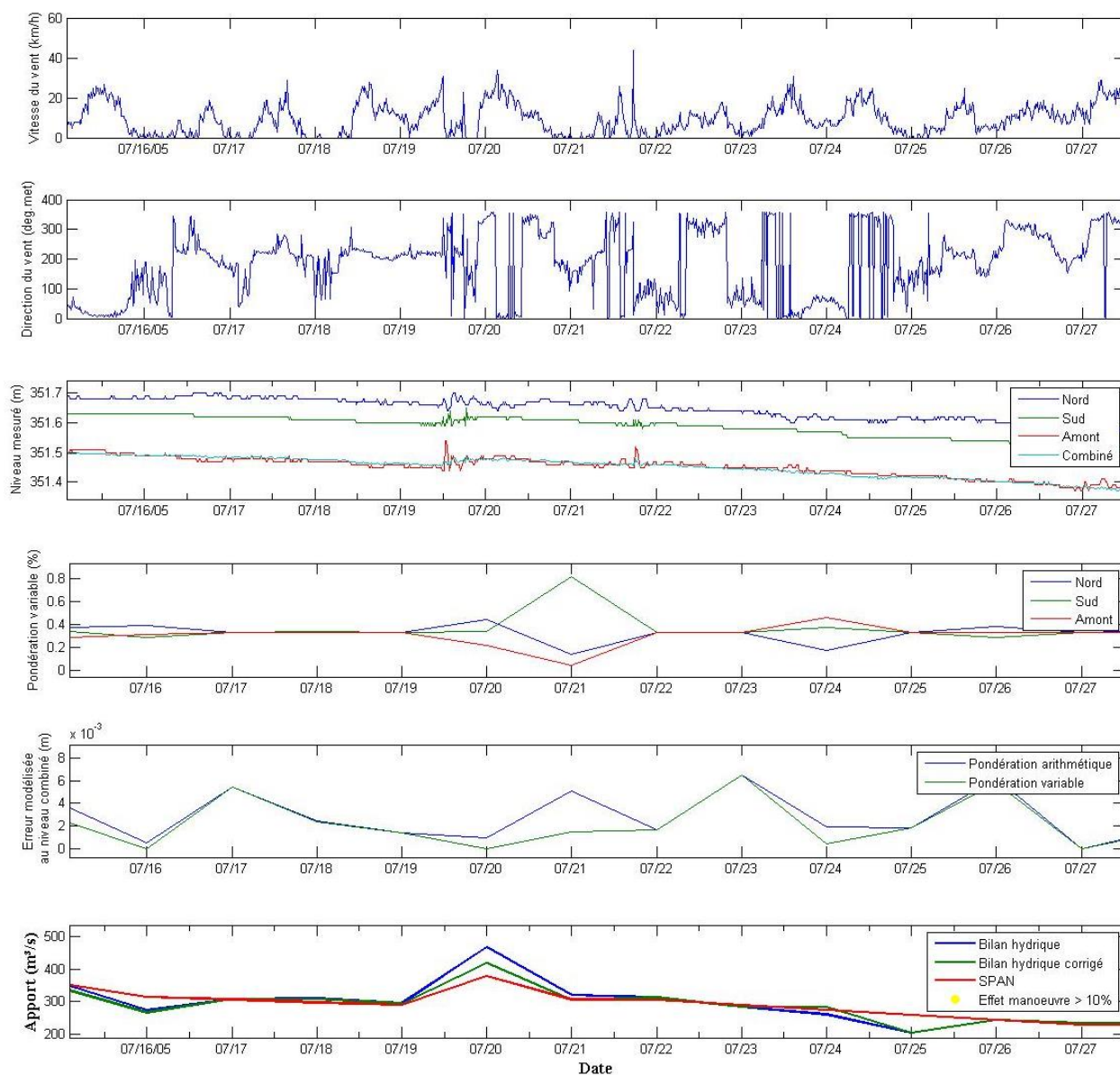


Figure 8-5 Correction d'un effet de vent observé entre le 19 juillet et le 21 juillet 2007 au réservoir Outardes 4

On peut observer à la Figure 8-5 que l'ajustement de pondération variable a permis de corriger une fluctuation d'apport naturel causé par une bourrasque de 30 km/h survenue à minuit du 20 juillet 2007. On remarque aussi que la nouvelle valeur d'apport obtenue s'approche beaucoup plus de la valeur de SPAN que celle obtenue par la méthode de bilan hydrique avec pondération arithmétique.

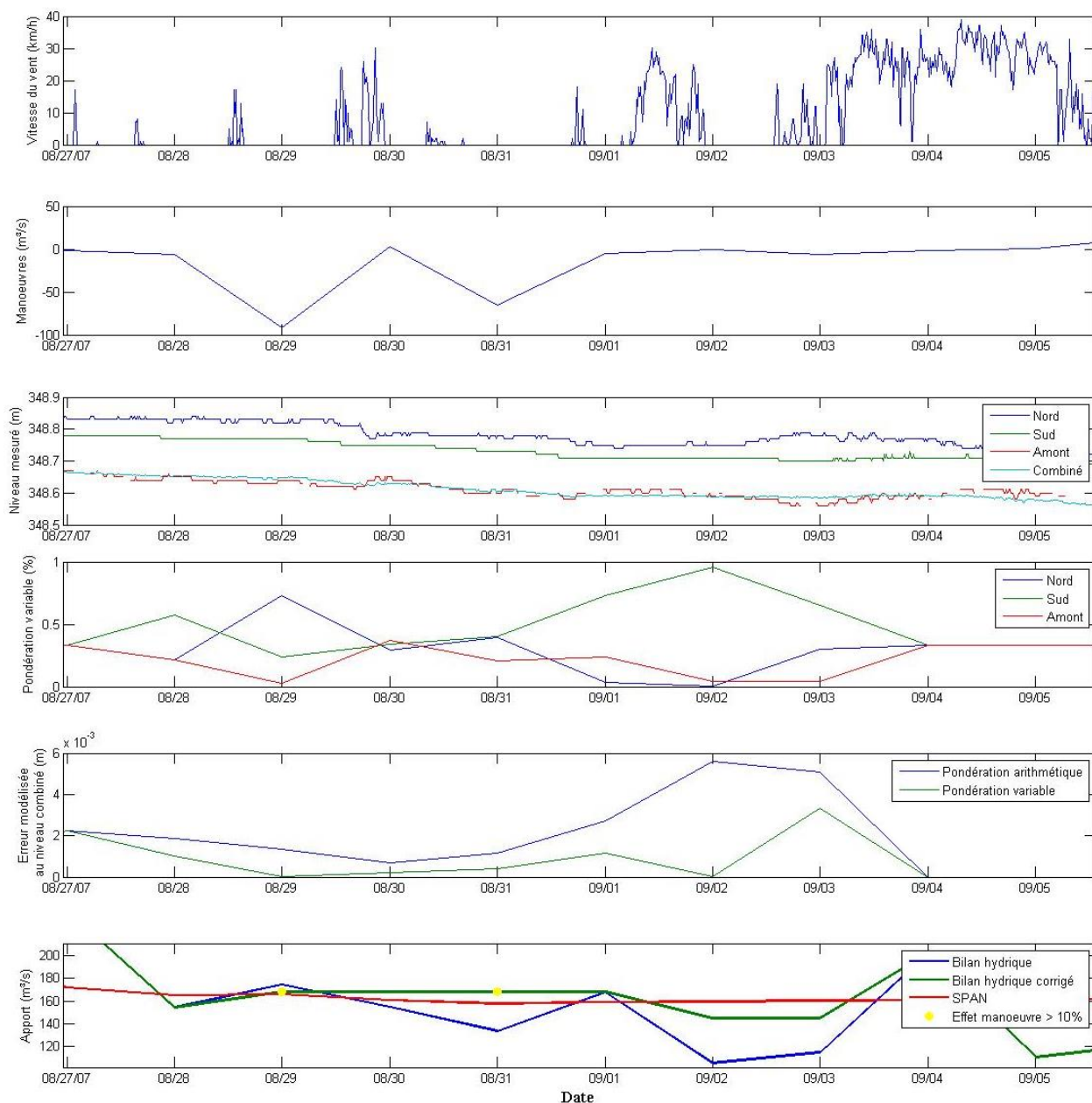


Figure 8-6 Correction de l'effet de deux manoeuvres hydrauliques effectuées entre le 29 et le 31 août 2007 au réservoir Outardes 4

On peut voir à la Figure 8-6 la correction du bilan hydrique pour deux manoeuvres hydrauliques survenues le 29 et le 31 août 2007 à Outardes 4. On peut observer à ces deux dates, que la pondération du limnimètre amont a été considérablement diminuée. L'apport calculé par bilan hydrique avec pondération variable suit la même tendance que les apports filtrés de SPAN contrairement aux apports calculés par bilan hydrique avec pondération arithmétique.

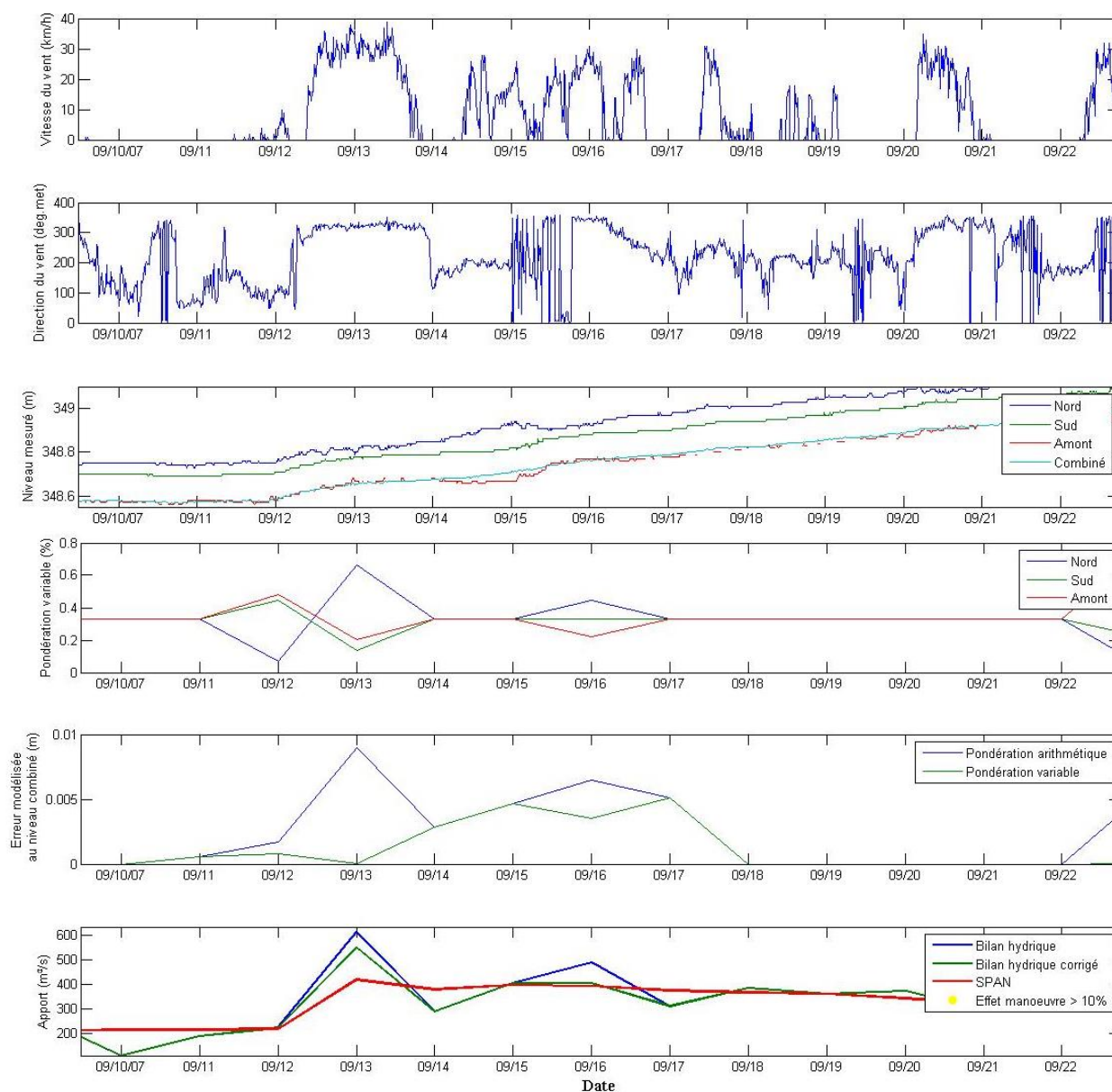


Figure 8-7 Correction d'un effet de vent observé entre le 12 septembre et le 17 septembre 2007  
au réservoir Outardes 4

On peut remarquer à la Figure 8-7 que la pondération variable a permis de réduire les fluctuations d'apport naturel du 13 et du 16 septembre. Ces fluctuations d'apport naturel ont probablement été causées par l'épisode de vent pour lequel la vitesse maximale a frôlé 40 km/h. Les apports obtenus par bilan hydrique corrigé sont beaucoup plus près des apports de filtrés de SPAN.

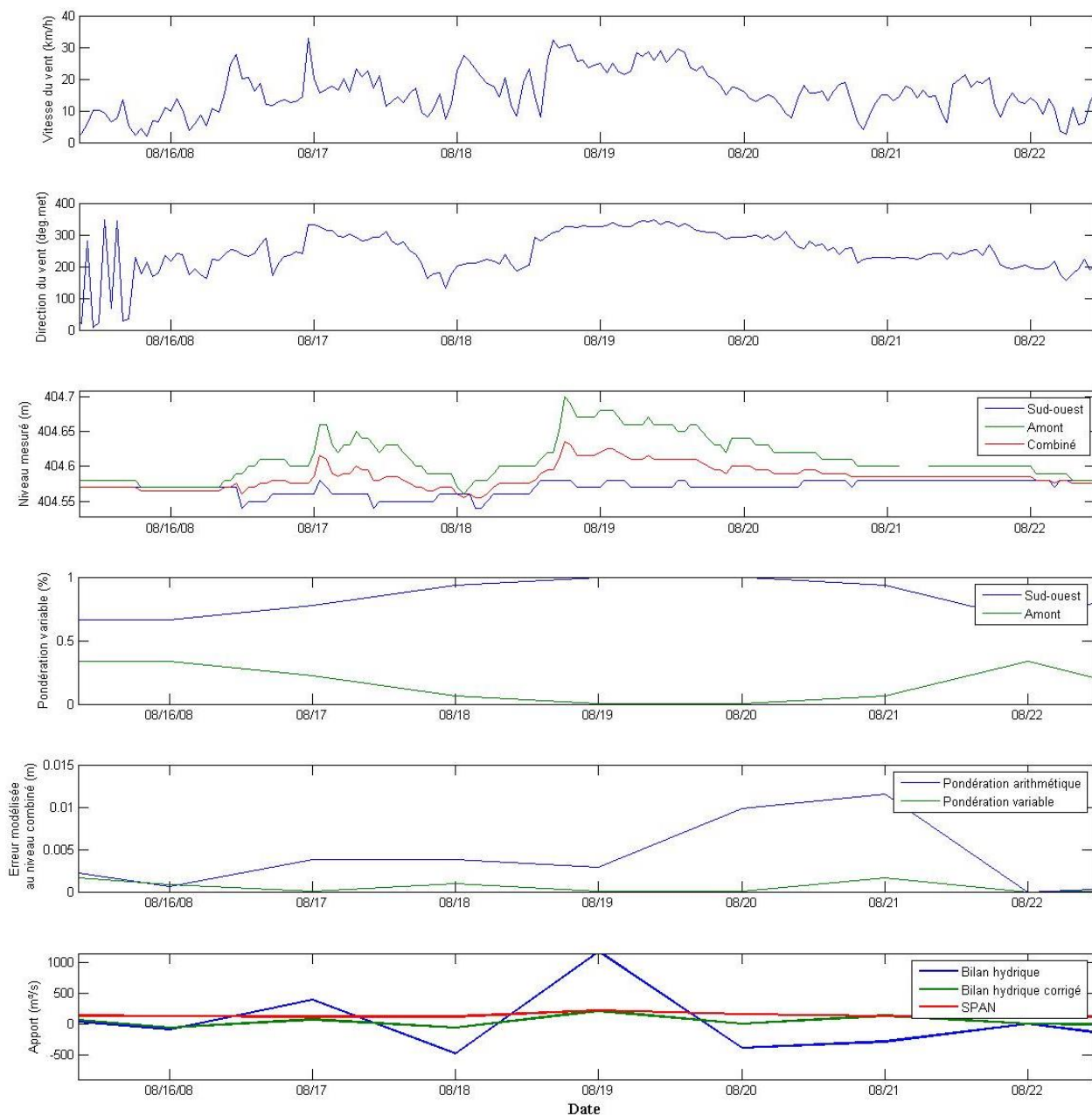


Figure 8-8 Correction d'un effet de vent observé entre le 16 et le 22 août 2008 au réservoir Gouin

On peut voir à la Figure 8-8 qu'un épisode de vent d'une vitesse maximale de 30 km/h a causé une série de fluctuations d'apports naturels consécutives entre le 16 et le 22 août. À partir de la troisième fenêtre de visualisation, on peut remarquer que l'effet du vent a principalement affecté le limnimètre amont. La méthode de pondération variable a donc diminué la pondération de ce limnimètre pour augmenter celle du limnimètre Sud-ouest. L'apport naturel calculé par pondération variable est donc beaucoup plus près des apports filtrés de SPAN.

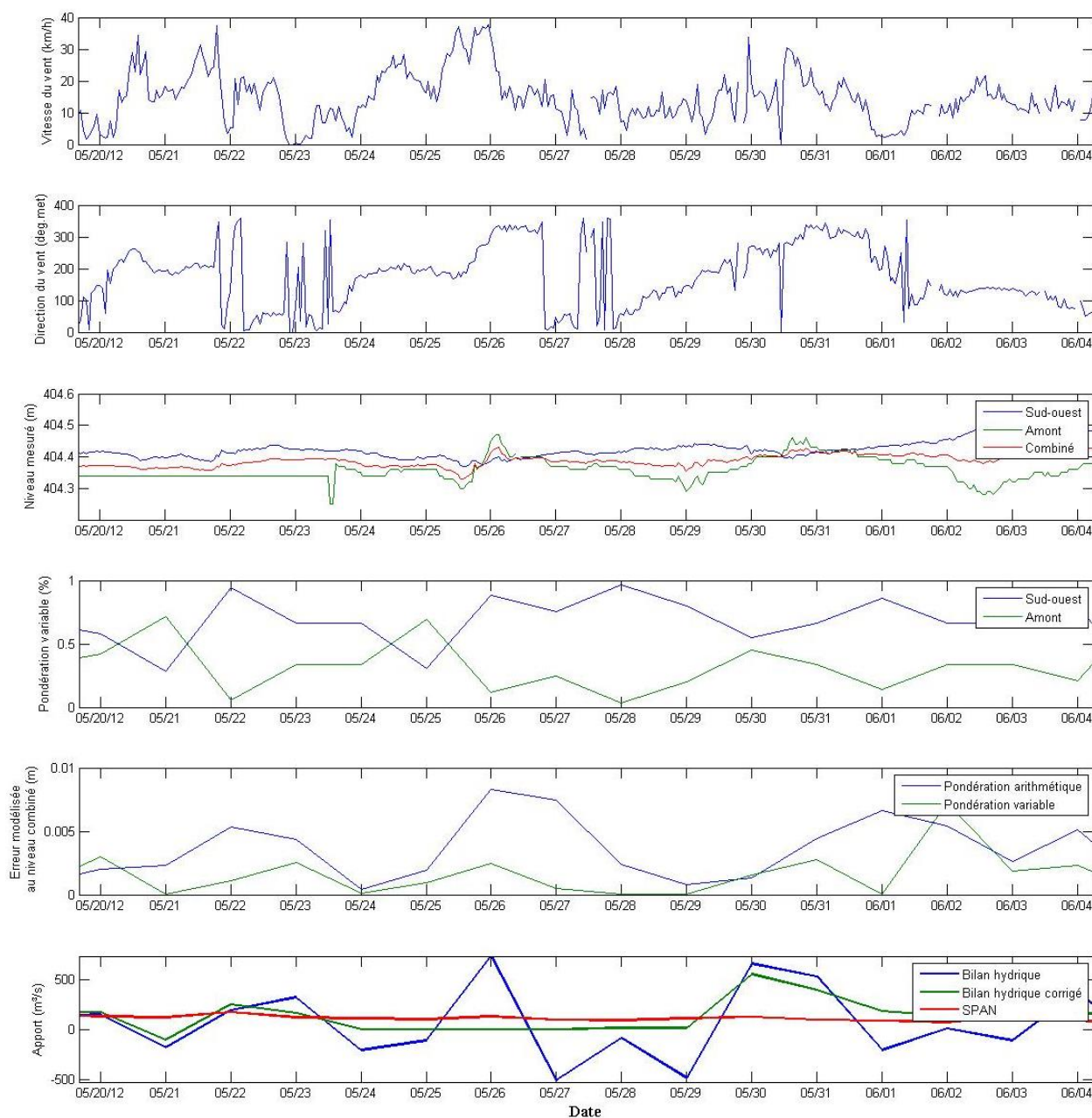


Figure 8-9 Correction d'un effet de vent observé entre le 24 et le 28 mai 2012 au réservoir Gouin

On peut observer à la Figure 8-9 que du 24 au 28 mai, la pondération du limnimètre Sud-ouest est augmentée afin de minimiser la réponse combinée  $R_{c,min}$ . Ceci permet de réduire les fluctuations d'apport du 26 et le 27 mai. La série d'apports naturels obtenue par bilan hydrique avec pondération variable est quasi égale à la série d'apports filtrés de SPAN.

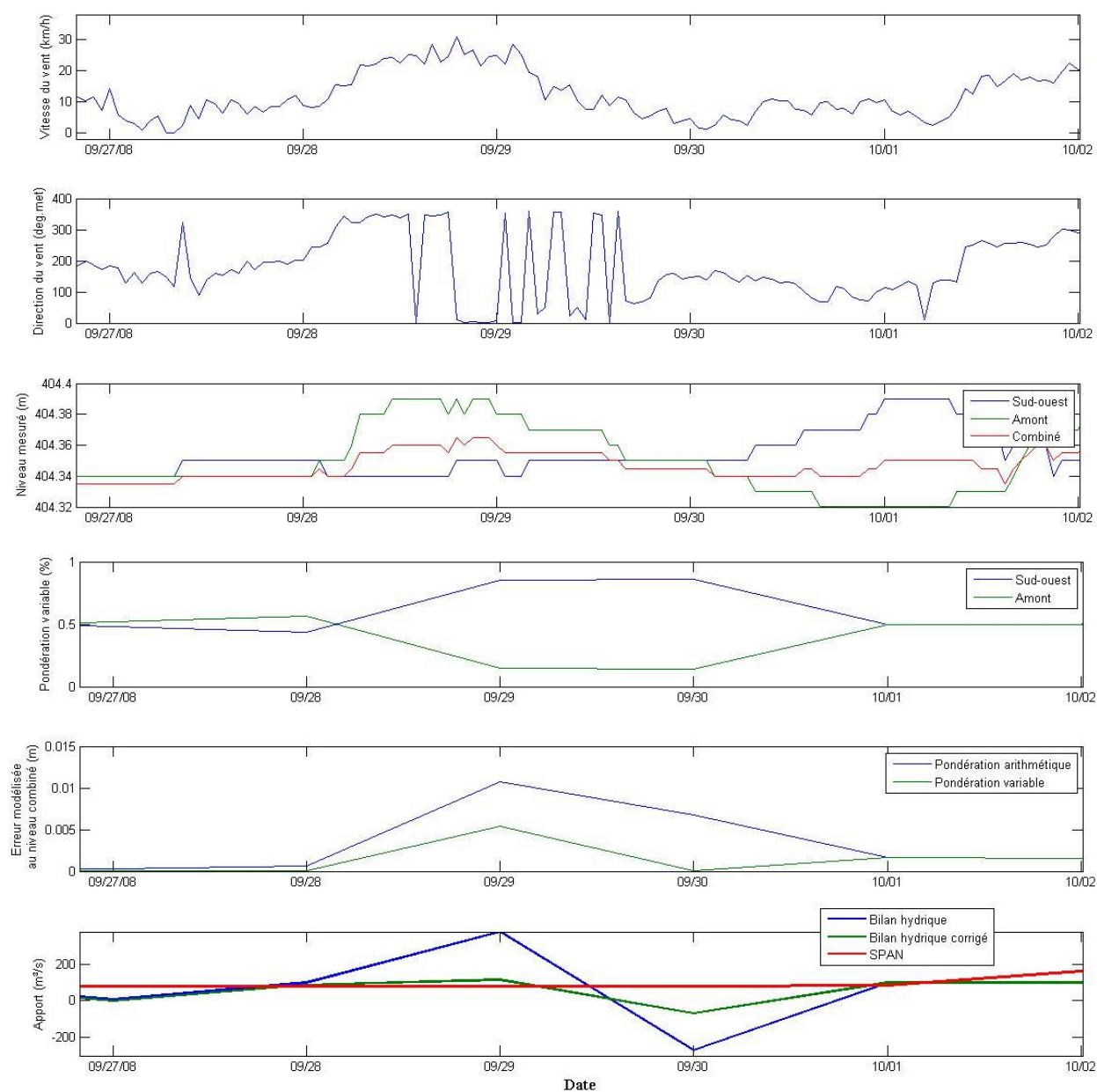


Figure 8-10 Correction d'un effet de vent observé entre le 28 septembre et le 1<sup>er</sup> octobre 2008 au réservoir Gouin

On peut observer à la Figure 7-10, qu'un vent de 30 km/h de direction presque constante à 350° survenu entre le 28 et le 30 septembre a provoqué un impact considérable sur le limnimètre amont. La pondération de celui-ci a été grandement réduite par la méthode de combinaison proposée. Cela a permis d'éviter des fluctuations d'apports naturels durant cet intervalle de temps. Les apports obtenus par pondération variable suivent la même tendance que les apports filtrés de SPAN contrairement aux apports par bilan hydrique obtenus par la meilleure pondération fixe.

Dans presque tous les cas, on peut observer que les séries d'apports obtenues par pondération variable se rapprochent plus de la série d'apports filtrés de SPAN. Cela peut s'expliquer par le fait que la série d'apports SPAN provient d'une part d'un modèle hydrologique qui n'est pas influencé par l'effet du vent/manœuvres et d'une autre part par le filtrage manuel d'un hydrologue averti.

Bien que les figures précédentes fournissent un bon aperçu du fonctionnement et de la performance de la méthode de combinaison proposée, il est intéressant d'évaluer les indicateurs de performance discutés à la section 8.3 pour les comparer à ceux obtenus par la meilleure pondération fixe.

Tableau 8-4 Comparaison d'indicateurs de performance pour la qualité du signal d'apport obtenu  
 – Meilleure pondération fixe VS pondération variable par réponse combinée minimisée –  
 Réservoir Outardes 4

Année	Écart type des $\Delta An$ (m <sup>3</sup> /s) *		Somme des fluctuations négatives (m <sup>3</sup> /s) *	
	Pondération fixe	Pondération variable	Pondération fixe	Pondération variable
	Moyenne arithmétique	Réponse combinée minimisée	Moyenne arithmétique	Réponse combinée minimisée
2005	69	<b><u>69</u></b>	<b><u>0</u></b>	0
2006	80	<b><u>77</u></b>	-17	<b><u>0</u></b>
2007	77	<b><u>74</u></b>	<b><u>0</u></b>	0
2008	112	<b><u>108</u></b>	<b><u>0</u></b>	0
2009	57	<b><u>57</u></b>	<b><u>0</u></b>	0
2010	58	<b><u>57</u></b>	<b><u>0</u></b>	0
2011	<b><u>66</u></b>	67	<b><u>0</u></b>	0
2012	71	<b><u>70</u></b>	<b><u>0</u></b>	0
<b>Moyenne</b>	74	<b><u>72</u></b>	-2	<b><u>0</u></b>

**Légende :**

\* Plus la valeur de l'indicateur est près de 0, meilleure est la performance de la méthode de combinaison  
**Meilleure méthode de combinaison**

Tableau 8-5 Comparaison d'indicateurs de performance pour la qualité du signal d'apport obtenu  
 – Meilleure pondération fixe VS pondération variable par réponse combinée minimisée –  
 Réservoir Gouin

Année	Écart type des $\Delta A_n$ (m <sup>3</sup> /s) *		Somme des fluctuations négatives (m <sup>3</sup> /s) *	
	Pondération fixe	Pondération variable	Pondération fixe	Pondération variable
	Pondération optimisée sur l'écart type des $\Delta A_n$	Réponse combinée minimisée	Pondération optimisée sur l'écart type des $\Delta A_n$	Réponse combinée minimisée
2007	311	<b><u>309</u></b>	-2.51E+04	<b><u>-2.19E+04</u></b>
2008	297	<b><u>251</u></b>	-1.52E+04	<b><u>-1.10E+04</u></b>
2009	268	<b><u>250</u></b>	-2.04E+04	<b><u>-1.62E+04</u></b>
2010	216	<b><u>167</u></b>	-1.79E+04	<b><u>-1.57E+04</u></b>
2011	208	<b><u>181</u></b>	-1.42E+04	<b><u>-1.12E+04</u></b>
2012	227	<b><u>203</u></b>	-1.63E+04	<b><u>-1.28E+04</u></b>
<b>Moyenne</b>	255	<b><u>227</u></b>	-1.82E+04	<b><u>-1.48E+04</u></b>

**Légende :**

\* Plus la valeur de l'indicateur est près de 0, meilleure est la performance de la méthode de combinaison

**Meilleure méthode de combinaison**

Le Tableau 8-4 et le Tableau 8-5 présentent la comparaison d'indicateurs de performance de la qualité du signal d'apport. Dans ces tableaux, la meilleure pondération fixe est comparée à la méthode de combinaison à pondération variable qui a été développée dans ce chapitre. Pour les deux réservoirs étudiés, la méthode de pondération variable améliore les indicateurs de qualité du signal d'apport par rapport à la meilleure pondération fixe. Pour le réservoir Gouin, on note une forte amélioration passant de 255 m<sup>3</sup>/s à 227 m<sup>3</sup>/s pour l'écart type moyen des  $\Delta A_n$ . Pour l'indicateur de la somme des fluctuations négatives d'apport, la méthode de pondération variable domine.

Il est également possible de remarquer que la méthode de pondération variable améliore substantiellement les indicateurs de qualité au réservoir Gouin, mais qu'au réservoir Outardes 4, ils ne sont que très peu améliorés. Ceci peut s'expliquer par le faible impact du vent/manœuvres sur le calcul d'apport par bilan hydrique à Outardes 4. Ce constat est par ailleurs cohérent avec l'incertitude déterminée pour ce réservoir au Chapitre 5 qui était d'environ 20 m<sup>3</sup>/s.

De plus, la qualité du signal d'apport naturel à Gouin reste beaucoup inférieure à celle d'Outardes 4. Ceci peut s'expliquer par le faible nombre de limnimètres au réservoir Gouin pour couvrir toute sa surface. En fait, un nombre minimal de 3 limnimètres sont nécessaires pour espérer entièrement corriger les erreurs de vent sur un réservoir (Croley, 1987). Sur Gouin, il n'y a que 2 limnimètres ce qui limite la correction des effets de vent perpendiculaires à l'axe reliant les limnimètres. À cause de cela, des fluctuations dans les apports persisteront, peu importe la méthode qui sera employée pour réduire les effets de vent.

## 8.5 Conclusions et recommandations

L'objectif de ce chapitre était d'expérimenter différentes méthodes pour réduire l'erreur du vent/manœuvre lors du calcul d'apport naturel par bilan hydrique. Tout d'abord, une analyse de sensibilité du pas de temps du bilan hydrique a été effectuée. Par la suite, différentes méthodes de combinaison extraites de la littérature ont été expérimentées. Ensuite, une nouvelle méthode de combinaison a été élaborée. Cette méthode ajuste les pondérations des limnimètres dans l'objectif de minimiser la réponse combinée. Celle-ci a pu être déduite à partir des modélisations effectuées au Chapitre 6 et au Chapitre 7. Finalement, cette nouvelle méthode de combinaison a été comparée avec des méthodes plus conventionnelles.

En résumé, les points à retenir pour ce chapitre sont les suivants :

- L'incertitude de l'effet du vent sur les apports naturels diminue au fur et à mesure que le pas de temps du bilan hydrique augmente entre 1 jour et 15 jours. Au-delà d'un pas de temps de 15 jours, une erreur résiduelle de quelques  $\text{m}^3/\text{s}$  persiste. Il n'y a donc aucun gain à utiliser un pas de temps supérieur à 15 jours pour éliminer les effets de vent dans le calcul d'apport naturel. Ceci est vrai autant pour le réservoir Gouin que le réservoir Outardes 4.
- Parmi les méthodes de combinaison conventionnelles fixes, la méthode de pondération arithmétique a donné le signal d'apport le moins bruité à Outardes 4.
- Parmi les méthodes de combinaison conventionnelles fixes, la méthode de pondération qui minimise l'écart type de la variation du niveau combiné a donné le signal d'apport le moins bruité à Gouin.

- L'algorithme du niveau virtuel performe bien au réservoir Gouin, mais ne performe pas à Outardes 4. La performance de cette méthode quant à l'applicabilité à un autre réservoir n'est pas garantie.
- La nouvelle méthode de combinaison proposée dans ce chapitre permet de réduire simultanément l'effet du vent et des manœuvres. Cette méthode a été élaborée pour être appliquée en temps réel. Cette méthode consiste à minimiser la réponse combinée qui est déduite par la modélisation des manœuvres sur le limnimètre amont ainsi que de la modélisation des réponses du vent aux limnimètres
- La nouvelle méthode de combinaison a permis d'améliorer la qualité du signal d'apport aux deux réservoirs étudiés. Un faible gain par rapport à la pondération arithmétique est obtenu à Outardes 4 malgré le très faible impact de l'effet du vent/manœuvre sur le bilan pour ce réservoir. Pour Gouin, un gain beaucoup plus important a été obtenu. Cependant, beaucoup d'erreurs et de fluctuations d'apport persistent pour ce réservoir en raison de la faible densité de limnimètres qui y sont installés.

## CHAPITRE 9 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

L'objectif principal de ce rapport était d'évaluer et de corriger l'incertitude sur les apports naturels causée par l'effet du vent et des manœuvres hydrauliques. Pour ce faire, différentes méthodologies de modélisation de ces effets sur les niveaux d'eau ont été investiguées et expérimentées. Les résultats obtenus par modélisation ont ensuite permis d'élaborer une méthodologie pour corriger en temps réel les fluctuations des niveaux d'eau non représentatives du débit d'écoulement naturel qui alimente les réservoirs.

Aux fins des analyses, Outardes 4 et Gouin ont été utilisés comme réservoirs témoins parce que les effets de vent sur ces réservoirs avaient été étudiés antérieurement par Haché et al. (2003). Les données hydrométéorologiques, hydrométriques et bathymétriques fournies par Hydro-Québec ont permis d'élaborer et de calibrer un modèle hydrodynamique pour chacun des réservoirs témoin ainsi que de mettre en relation les effets du vent et de manœuvres hydrauliques avec les niveaux d'eau captés par les limnimètres.

Le Chapitre 2 qui visait à répondre au premier objectif de ce travail, a été dédié à la revue de littérature qui a été nécessaire pour guider la méthodologie de ce mémoire. Dans un premier temps, la méthodologie de calcul des apports naturels par bilan hydrique tel qu'effectué par Hydro-Québec a été expliquée. Ensuite, les différents moyens existants pour modéliser les effets de vent et les manœuvres hydrauliques sur les réservoirs ont été discutés. Finalement, les moyens pour réduire les incertitudes d'apport provenant de ces effets ont été décrits.

Le Chapitre 3 a permis de décrire succinctement la méthodologie qui a été appliquée pour les activités de recherche.

Le Chapitre 4 a permis de décrire les réservoirs témoins ainsi que les données utilisées au cours de ce mémoire.

Le Chapitre 5 qui visait à répondre au deuxième objectif de ce travail consistait à évaluer l'incertitude d'apport causée par l'effet du vent en utilisant un modèle hydrodynamique. Pour ce faire, des simulations hydrodynamiques en écoulement non permanent et en système fermé ont été effectuées. Selon ces conditions, à partir des niveaux d'eau obtenus par simulation, le niveau combiné simulé a été déduit avec la méthode de combinaison par pondération arithmétique. Ensuite, l'estimation de l'incertitude d'apport a été effectuée avec l'équation de bilan hydrique en

ne considérant que la variation du niveau combiné simulé. Cette démarche a permis d'évaluer à 20 m<sup>3</sup>/s l'incertitude de l'effet du vent au réservoir Outardes 4 et de 340 m<sup>3</sup>/s au réservoir Gouin. L'avantage d'utiliser un modèle hydrodynamique en écoulement non permanent est qu'il permet de prendre en considération les forces inertielles du plan d'eau ainsi que des conditions de vent variables dans le temps. Cependant, l'application en temps réel de cette méthodologie à l'ensemble du parc d'Hydro-Québec est pratiquement infaisable en raison du trop grand nombre de réservoirs à traiter.

Le Chapitre 6 qui visait à répondre au troisième objectif de ce travail consistait à évaluer l'incertitude du vent sur l'apport naturel en supposant une modélisation en écoulement permanent. Pour ce faire, la modélisation hydrodynamique en mode permanent ainsi que des méthodes de régressions non paramétriques ont été utilisées. L'hypothèse d'état permanent consiste à supposer que le plan d'eau est instantanément débalancé par le vent mesuré à chaque pas de temps. La démarche effectuée au cours de ce chapitre a principalement permis de déterminer que :

1. L'incertitude de l'effet du vent sur les apports naturels en écoulement permanent peut être sous-estimée de moitié par rapport à l'estimation de l'incertitude en écoulement non permanent.
2. La régression non paramétrique à deux variables explicatives est de loin la méthode la plus performante pour modéliser les effets de vent sur les réservoirs en supposant un écoulement permanent.
3. L'utilisation du modèle hydrodynamique a permis de démontrer qu'il est préférable d'étudier les réponses du vent à chaque limnimètre au lieu d'étudier les différences de niveau entre les limnimètres.
4. L'estimation de l'incertitude des apports causée par le vent en supposant un écoulement permanent devrait être effectuée en utilisant le vent maximal instantané observé durant la journée pour laquelle le bilan hydrique est effectué.

L'avantage d'estimer l'incertitude des apports en écoulement permanent est que cette méthode serait plus facilement applicable en temps réel. En effet, la modélisation de l'effet du vent à l'état permanent n'a besoin que d'être effectuée une seule fois dans la mesure où les simulations couvrent toutes les conditions de vent possibles d'être observées au réservoir

d'intérêt. Toutefois, ce type de méthode ne permet pas d'étudier les effets inertiels du plan d'eau lorsque le vent change de vitesse ou de direction brusquement. En considérant un état strictement permanent, il y a donc une certaine perte de réalisme de l'effet du vent sur les réservoirs par rapport à ce qui peut être obtenu avec les simulations hydrodynamiques en écoulement non permanent.

Le Chapitre 7 visait à répondre au quatrième objectif de ce travail. Celui-ci consistait à modéliser les effets des manœuvres hydrauliques sur le limnimètre amont de chaque réservoir témoin. Une fermeture complète des vannes de l'évacuateur de Gouin ou des groupes turbines-alternateur d'Outardes 4 entraîne une fluctuation du niveau amont d'au plus 1 cm. Bien que l'effet soit faible, il peut s'avérer non négligeable lorsqu'appliqué simultanément à un épisode de vent.

Le Chapitre 8 visait à répondre au cinquième et sixième objectif de ce travail. Il s'agissait d'expérimenter les méthodologies existantes pour réduire les erreurs du vent/manœuvres et de développer une nouvelle méthode de combinaison des variations du niveau enregistrées par les limnimètres. Cela a principalement permis de constater que :

1. L'utilisation d'un pas de temps de 15 jours dans l'équation de bilan hydrique de Gouin permet de minimiser les erreurs d'apport causées par l'effet du vent. Toutefois, une faible erreur persiste et ne peut être éliminée en augmentant davantage le pas de temps du bilan. Pour Outardes 4, un pas de temps de 15 jours dans le bilan hydrique minimise l'erreur d'apport causée par l'effet du vent. Toutefois, un pas de temps de 10 jours donne une erreur très faible.
2. La méthode de combinaison par pondération arithmétique telle qu'utilisée par Hydro-Québec est avantageuse au réservoir Outardes 4. Toutefois, au réservoir Gouin, certaines méthodes de pondération se sont avérées meilleures qu'une simple moyenne arithmétique.
3. Il est possible de réduire certaines fluctuations d'apport naturel à l'aide d'une méthodologie de pondération variable des limnimètres guidée par les résultats issus de la modélisation de l'effet du vent et des manœuvres hydrauliques.

Bien que certaines erreurs dans l'équation de bilan hydrique aient pu être évitées par la méthode de pondération variable proposée, plusieurs fluctuations persistent dans les signaux

d'apport naturel. L'élaboration de cette méthode a permis de constater la complexité de la correction des effets du vent/manœuvres sur l'équation de bilan hydrique en temps réel ainsi que tous les éléments à prendre en compte pour y parvenir efficacement. Le faible nombre de jauges limnimétriques et de stations de vent aux réservoirs ainsi que la difficulté de modélisation des réponses du vent/manœuvre aux limnimètres sont à l'origine de ce problème.

Au final, ce mémoire qui constitue une suite au travail de Haché et al. (2003), a permis d'identifier différentes pistes pour évaluer et contrôler l'incertitude du vent/manœuvres sur les apports naturels dans l'optique où Hydro-Québec désirerait prendre en compte ce type d'incertitude dans son système d'acquisition de données.

## 9.1 Contributions

Les contributions et les points positifs découlant de cette recherche sont énumérés ci-dessous :

- Deux modèles hydrodynamiques pour les réservoirs Outardes 4 et Gouin ont été élaborés. Hydro-Québec pourra réutiliser ces modèles pour d'autres usages.
- Une estimation de l'ordre de grandeur de l'incertitude de l'effet du vent sur l'équation du bilan hydrique à l'échelle journalière a été effectuée selon différentes méthodes avec leurs hypothèses respectives. Ce type d'estimation n'a pas été effectué jusqu'à présent à Hydro-Québec ou dans la littérature.
- La position optimale pour un troisième limnimètre au réservoir Gouin a été déterminée à l'aide des simulations hydrodynamiques permanentes. L'installation d'un nouveau limnimètre à cet emplacement permettrait de minimiser l'effet du vent sur l'équation du bilan hydrique.
- Le pas de temps optimal du bilan hydrique pour minimiser l'incertitude amenée par le vent a été estimé à l'aide des résultats des simulations hydrodynamiques à l'état non permanent. Il a été déterminé que l'utilisation d'un pas de temps de 15 jours constitue un bon compromis entre la réduction de l'incertitude amenée par le vent et la perte d'information amenée par le choix d'un trop grand pas de temps.

- Une nouvelle méthode de combinaison à pondération variable a été développée. Les pondérations s'ajustent à chaque pas de temps du bilan hydrique dans le but de minimiser l'effet du vent et des manœuvres hydrauliques préalablement modélisés.

## 9.2 Recommandations

Afin de pousser un peu plus loin l'analyse de l'incertitude du vent et manœuvres hydrauliques, certaines recommandations pourraient être envisagées quant à la modélisation et à la correction de ces effets.

Pour la modélisation de l'effet du vent en écoulement non permanent :

- Seulement la propagation des vagues de longues périodes a été prise en compte lors des simulations hydrodynamiques en état non permanent. Il serait intéressant de vérifier si la représentativité de ces simulations pourrait être améliorée en incluant également la génération et la propagation des vagues de courtes périodes. Il suffirait alors de coupler le modèle TELEMAC 2D avec un modèle de propagation/agitation des vagues tels que TOMAWAC ou ARTEMIS.
- Il serait intéressant d'introduire l'effet de la rugosité de surface dans la formulation du coefficient de traînée tel que recommandé par North (2006).

Pour la modélisation de l'effet du vent en écoulement permanent :

- Pour améliorer la performance du modèle hydrodynamique, il serait nécessaire d'augmenter la discrétisation de la direction du vent et du coefficient de traînée. En augmentant suffisamment ces discrétisations, il serait possible d'obtenir un modèle hydrodynamique aussi performant que les méthodes de régressions non paramétriques.
- Pour améliorer davantage la régression non paramétrique à deux variables explicatives, il serait possible d'établir différentes relations selon différents groupes de niveau d'exploitation.
- Pour introduire un certain effet temporel dans la régression non paramétrique, il serait possible d'établir différentes relations selon différents groupes de coefficient de rugosité de surface. Il faudrait cependant estimer ce coefficient pour chaque observation de vent.

- Il reste à déterminer une façon optimale pour prendre en compte les effets des forces inertielles (seiches) lorsque le vent change de vitesse ou de direction rapidement. La méthode de la réponse impulsionnelle tel que discuté à la section 2.3.4 pourrait constituer une piste dans la mesure où elle était appliquée sur les forces inertielles au lieu de la dénivellation due au vent.

Pour la modélisation de l'effet des manœuvres :

- Il serait intéressant de tenter d'introduire un facteur temporel dans la modélisation des manœuvres hydrauliques. En fait, ces phénomènes peuvent générer des vagues irrégulières qui devraient être prises en charge dans une modélisation à caractère non permanent.
- Seulement l'effet des manœuvres hydrauliques sur le terme d'emménagement a été étudié. En réalité, leur effet peut également affecter le limnimètre juste en aval des ouvrages faisant en sorte que le calcul de la hauteur de chute peut contenir une erreur. Conséquemment, une erreur dans le terme du débit sortant de l'équation du bilan hydrique est également possible.

Pour la correction des effets de vent/manœuvres :

- La nouvelle méthode de pondération variable a été expérimentée sur le réservoir Outardes 4 où la qualité du signal d'apport est excellente. La même méthode a été appliquée sur le réservoir Gouin où la qualité d'apport est moins bonne. Il serait intéressant de la tester sur un réservoir intermédiaire entre Outardes 4 et Gouin en termes de qualité de signal d'apport. Un réservoir à au moins 3 limnimètres avec une qualité de signal légèrement moins bonne qu'à Outardes 4 serait idéal.
- Toute la méthodologie effectuée ne considère qu'une seule station de vent. En réalité, les composantes du vent peuvent grandement varier à l'échelle des réservoirs étudiés. Il serait intéressant de développer une méthodologie permettant de prendre en compte la variabilité spatiale du vent.
- John et al. (1995) ont étudié les erreurs de l'effet du vent dans l'équation du bilan hydrique sur un petit réservoir. Il a été déterminé que même sur un petit réservoir, l'effet

du vent peut tout de même affecter le bilan hydrique. Il serait donc intéressant d'appliquer la méthodologie de ce rapport sur de plus petits réservoirs.

- Afin de corriger l'effet du vent dans le bilan hydrique à des moments où il n'y a pas de mesures de vent, il serait intéressant d'utiliser des modèles régionaux comme par exemple les grilles de réanalyse NARR (North American Regional Reanalysis). Ces grilles comportent des données de vent à un intervalle de 3 heures.

## RÉFÉRENCES

- Alarie, S. (2009). Recommandations sur l'amélioration du calcul des apports naturels au pas de temps horaire. *IREQ-2009-0064 - Diffusion Hydro-Québec*.
- Anctil, F., Rousselle, J., & Lauzon, N. (2012). *Hydrologie : cheminements de l'eau* (2e ed.): Presses internationales polytechnique.
- Anyah, R. O., & Semazzi, F. (2009). *Idealized simulation of hydrodynamic characteristics of Lake Victoria that potentially modulate regional climate*, Southern Gate, Chichester, West Sussex, PO19 8SQ, United Kingdom.
- Baird, & Associates. (2000). *Review of Lake Winnipeg water level reporting procedures*. W.F. Baird & Associates coastal engineers LTD. Ottawa, Ontario.
- Bekic, D., Ervine, D., & Lardet, P. (2006). *A COMPARISON OF ONE- AND TWO-DIMENSIONAL MODEL SIMULATION OF THE CLYDE ESTUARY, GLASGOW*. Paper presented at the The 7th Int. Conf. on Hydrosience and Engineering (ICHE-2006), Sep 10 –Sep 13, Philadelphia, USA.
- Beletsky, D., Schwab, D. J., Roebber, P. J., McCormick, M. J., Miller, G. S., & Saylor, J. H. (2003). Modeling wind-driven circulation during the March 1998 sediment resuspension event in Lake Michigan. *Journal of Geophysical Research*, 108(C2), 20-21. doi: 10.1029/2001jc001159
- Bennis, S., Cote, S., & Kang, N. (1996). Validation des donnees hydrometriques par des techniques multivariees de filtrage. *Canadian journal of civil engineering*, 23(1), 218-230.
- Berger, R. C., Tate, J. N., Brown, G. L., & Savant, G. (2013). Adaptive Hydraulics USACE (Ed.) *A two-dimensional modeling system developed by the coastal and hydraulics laboratory engineer research and development center, A product of the system-wide water resources program, Users Manual : Guidelines for solving two-dimensional whallow water problems with the Adaptive Hydraulics Modeling System*
- Bisson, J.-L. (1979). Modèle de prévision des apports naturels de l'Hydro-Québec, Rapport interne Hydro-Québec
- Chapman, R., Johnson, B. H., & Vemulakonda, R. (1996). User's guide for the Sigma Stretched Version of CH3D-WES.
- Bruce, J. P., Clark, R. H., Introduction to hydrometeorology., Oxford (Pergamon Press) 1966. Pp. ix, 319 : 79 Figures, 25 Tables, 2 Appendices. £1 10s. Od. (1967). *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 93(395), 151-151. doi: 10.1002/qj.49709339530
- Chimney, M. J. (2005). Surface seiche and wind set-up on Lake Okeechobee (Florida, USA) during hurricanes Frances and Jeanne. *Lake and Reservoir Management*.
- Cleveland, William S. (1979). "Robust Locally Weighted Regression and Smoothing Scatterplots". *Journal of the American Statistical Association* 74(368): 829–836. doi:[10.2307/2286407](https://doi.org/10.2307/2286407) . JSTOR 2286407. MR 0556476.

- Cook, A. C. (2008). *Comparison of one-dimensional HEC-RAS with two-dimensional FESWMS model in flood inundation mapping*. Master, Purdue University, West Lafayette, Indiana. Tiré de [http://web.ics.purdue.edu/~vmerwade/reports/2008\\_02.pdf](http://web.ics.purdue.edu/~vmerwade/reports/2008_02.pdf)
- Croley, T. E. (1987). Wind set-up error in mean lake levels. *Journal of Hydrology*, 92(3-4), 223-243. doi: 10.1016/0022-1694(87)90015-1
- Deltares. (2012). Delft3D, Deltares systems (Ed.) *3D/2D modelling suite for integral water solutions User Manual*
- Deltares. (2013). SOBEK, Deltares systems (Ed.) *1D/2D modelling suite for integral water solutions, User Manual*
- DHI. (2007). MIKE 21 Flow model, DHI Software (Ed.) *Hydrodynamic Module User Guide*
- DHI. (2009). MIKE 11 DHI Software (Ed.) *A modelling system for rivers and channels User Guide*
- Donnell, B. P., Letter, J. V., Finnie, J. I., King, I., & Roig, L. C. (2006). User guide to RMA2 WES version 4.5. *US Army, Engineer Research and Development Center, Waterways Experiment Station, Coastal and Hydraulics Laboratory*.
- EDF. (2010). TELEMAC modelling system *2D hydrodynamics TELEMAC-2D software Version 6.0 USER MANUAL* (pp. 118).
- EDF. (2013). TELEMAC Modelling System. *TELEMAC-3D Software Release 6.2 operating manual*.
- Franz, D., & Melching, C. S. (1997). Full Equations (FEQ) Model for the Solution of the Full, Dynamic Equations of Motion for One-Dimensional Unsteady Flow in Open Channels and through Control Structures.
- Fread, D. L., & Lewis, J. M. (1998). NWS FLDWAV MODEL.
- Garratt, J. R. (1977). Review of Drag Coefficients over Oceans and Continents. *Monthly Weather Review*, 105(7), 915-929. doi: 10.1175/1520-0493(1977)105<0915:rodcoo>2.0.co;2
- Graf, W. H., & Altinakar, M. S. (2000). *Hydraulique fluviale, Écoulement et phénomènes de transport dans les canaux à géométrie simple* (Vol. 16): Presses polytechniques et universitaires romandes.
- Haché, M., Durocher, M., & Bobée, B. (2003). Nonparametric modelling of the relation between the characteristics of the wind effect on water levels in a large reservoir. *Modélisation non paramétrique de la relation entre les caractéristiques du vent et la différence de niveaux sur un grand réservoir*, 30(4), 684-695.
- Haché, M., Perreault, L., & Bobée, B. (1996). Validation des apports naturels historiques, Rapport final du projet C1. *Chaire industrielle CRSNG - Hydro-Québec en Hydrologie statistique - INRS-EAU*.
- Harris, D. L. (1953). Wind tide and seiches in the Great Lakes.
- Heinrich, J. C., Lick, W. J., & Paul, J. F. (1983). Validity of a two-dimensional model for variable-density hydrodynamic circulation. *Mathematical Modelling*, 4(4), 323-337. doi: 10.1016/0270-0255(83)90057-x

- Henderson-Sellers, B. 1984. *Engineering Limnology*. Pitman Publishing Limited, London, UK. 356 p.
- Hervouet, J.-M. (2007). *Hydrodynamics of free surface flows : modelling with the finite element method* (Chichester ed.). Angleterre: Wiley.
- Hodges, B., & Dallimore, C. (2007). *Estuary, Lake and Coastal Ocean Model : ELCOM v2.2 User Manual*.
- Hsu, S. A., Grymes, J. M., & Yan, Z. (1997). A simplified hydrodynamic formula for estimating the wind-driven flooding in the lake Pontchartrain-Amite river basin. *National Weather Digest*, 21(4).
- Hutchinson, G.E. 1957. *A Treatise on Limnology*. Vol. I, Geography, Physics, and Chemistry. John Wiley & Sons, Inc., New York, NY. 1015 p.
- John, V. C., Satish, M. G., & Waller, D. H. (1995). Development and evaluation of numerical hydrodynamic models for small lakes and reservoirs. *Canadian journal of civil engineering*, 22(2), 270-282.
- Lee, H., Chung, S., Ryu, I., & Choi, J. (2013). Three-dimensional modeling of thermal stratification of a deep and dendritic reservoir using ELCOM model. *Journal of Hydro-environment Research*, 7(2), 124-133. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jher.2012.10.002>
- Letchford, C. W., & Zachry, B. C. (2009). *On wind, waves and surface drag*. Paper presented at the EACWE 5, Florence, Italy.
- Li, Y.-P., Tang, C.-Y., Yu, Z.-B., & Acharya, K. (2012). Uncertainty and sensitivity analysis of large shallow lake hydrodynamic models. *Shuikexue Jinzhan/Advances in Water Science*, 23(2), 271-277. doi: Cnki:32.1309.p.20120224.2002.009
- Luettich, R., & Westerink, J. (2004). Formulation and numerical implementation of the 2D/3D ADCIRC finite element model version 44.XX.
- Markfort, C. D., Perez, A. L. S., Thill, J. W., Jaster, D. A., Porte-Agel, F., & Stefan, H. G. (2010). Wind sheltering of a lake by a tree canopy or bluff topography. *Water Resources Research*, 46(3). doi: 10.1029/2009wr007759
- Neveskiotis, H., Tserdani, K., Sarris, I. E., Karakasidis, T. E., & Liakopoulos, A. (2010). *3-D simulations of flows in the reconstituted lake Karla, Thessaly, Greece*. Paper presented at the 6th International Symposium on Environmental Hydraulics, June 23, 2010 - June 25, 2010, Athens, Greece.
- North, R. P. (2006). *Implications of Non-Uniform Wind Stress on Lake Circulation*. Master of Applied Science, The University of British Columbia.
- Olsen, N. R. B. (2007). *Numerical Modelling and Hydraulics*. Course literature, The Norwegian University of Science and Technology. Retrieved from [http://www.iahrmedialibrary.net/add\\_res/inc/mat/i003\\_flures6.pdf](http://www.iahrmedialibrary.net/add_res/inc/mat/i003_flures6.pdf) (ISB 82-7598-074-7)
- Quinn, F. H., and M. J. Todd, 1974. Lake Superior beginning-of-month water levels and monthly rates of storage changes. U.S. Gov. Print. Off., Washington, D.C., NOAA Tech. Memo. NOS LSC R4, 38 pp.

- Roy, R., Gauthier, R., & Hetu, M. (1992). *Hydrometeorological data quality improvement by implementing an autonomous acquisition network in barren areas*. Paper presented at the 4th International Conference on Hydraulic Engineering Software - HYDROSOFT/92, July 1, 1992 - July 1, 1992, Valencia, Spain.
- Rueda, F. J., & Schladow, S. G. (2003). Dynamics of large polymictic lake. II: Numerical simulations. *Journal of Hydraulic Engineering*, 129(2), 92-101. doi: 10.1061/(asce)0733-9429(2003)129:2(92)
- Schwab, D. J. (1978). Simulation and forecasting of Lake Erie storm surges.
- Silverman, B. W. (1985). Some aspects of the spline smoothing approach to non-parametric regression curve fitting. *Journal of the Royal Statistical Society*, 47(1). pages
- Simons, T. J., & Schertzer, W. M. (1989). Modeling wind-induced water setup in Lake St. Clair. *Journal of Great Lakes Research*, 15(3), 452-464.
- Taylor, P. A., & Salmon, J. R. (1993). A Model for the Correction of Surface Wind Data for Sheltering by Upwind Obstacles. *Journal of Applied Meteorology*, 32(11), 1683-1694. doi: 10.1175/1520-0450(1993)032<1683:amftco>2.0.co;2
- Umgiesser, G., Canu, D. M., Cucco, A., & Solidoro, C. (2004). A finite element model for the Venice Lagoon. Development, set up, calibration and validation. *Journal of Marine Systems*, 51(1-4 SPEC. ISS.), 123-145. doi: 10.1016/j.jmarsys.2004.05.009
- USACE. 1955. Waves and wind tides in shallow lakes and reservoirs, Lake Okeechobee, Florida. Civil Works Investigation Project, CW-167: Summary Report. U.S. Army Corps of Engineers, Office of the District Engineer, Jacksonville, FL. 101 p.
- USACE. 1977. Shore Protection Manual, 3rd Ed. Vol I. U.S. Army Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center, VA. 474 p.
- Vieira, J. R., & Lanfredi, N. W. (1996). A hydrodynamic model for the Rio de La Plata, Argentina. *Journal of Coastal Research*, 12(2), 430-446.
- WBM, B. (2010). TUFLOW AD user manual build 2010-10-AD.
- Wen-Cheng, L., Wei-Bo, C., & Chih-Yu, C. (2012). Numerical modeling of hydrodynamic and hydrothermal characteristics in subtropical alpine lake. *Applied Mathematical Modelling*, 36(5), 2094-2109. doi: 10.1016/j.apm.2011.08.011
- Westerink, J. J., Luetich, R. A., Feyen, J. C., Atkinson, J. H., Dawson, C., Roberts, H. J., Pourtaheri, H. (2008). A basin- to channel-scale unstructured grid hurricane storm surge model applied to southern Louisiana. *Monthly Weather Review*, 136(3), 833-864. doi: 10.1175/2007mwr1946.1
- Wu, J. (1980). Wind-Stress coefficients over Sea surface near Neutral Conditions—A Revisit. *Journal of Physical Oceanography*, 10(5), 727-740. doi: 10.1175/1520-0485(1980)010<0727:wscoss>2.0.co;2
- Zervas, C. (1997). *The accuracy of Great Lakes mean water level computations using reduced network configurations*.

## ANNEXE 1 – Calibration du modèle hydrodynamique 2D à l'état permanent pour le réservoir Gouin

Tableau A1-1 Les 168 simulations de calibration de TELEMAC 2D pour un  $C_D = 0.5 \times 10^{-3}$

Coefficient de traînée (--)	Vitesse du vent (km/h)	Direction (deg.met)	RMSE/Direction (cm)	RMSE/Direction M0 * (cm)	RMSE/Vitesse (cm)	RMSE/Vitesse M0 * (cm)	RMSE/Traînée (cm)	RMSE M0 * (cm)
0.5 x 10 <sup>-3</sup>	5	315-45	2.08	2.10	2.62	2.68	3.39	3.86
		45-135	3.11	3.26				
		135-225	2.59	2.62				
		225-315	<b>2.09</b>	2.06				
	10	315-45	2.37	2.43	3.19	3.33		
		45-135	4.52	4.85				
		135-225	3.23	3.29				
		225-315	2.51	2.64				
	15	315-45	2.51	2.71	3.35	3.60		
		45-135	5.83	6.55				
		135-225	3.57	3.62				
		225-315	2.97	3.41				
	20	315-45	3.56	3.94	3.59	4.13		
		45-135	6.68	7.82				
		135-225	<b>3.52</b>	3.56				
		225-315	3.47	4.41				
	25	315-45	3.88	4.64	4.00	5.01		
		45-135	7.73	9.51				
		135-225	<b>3.25</b>	3.16				
		225-315	4.24	5.67				
	30	315-45	4.91	6.04	4.89	6.42		
		45-135	9.92	12.96				
		135-225	<b>4.17</b>	4.12				
		225-315	5.02	7.17				

**Légende :**

\* M0 = Modèle nul, sans vent

**Meilleur score au RMSE parmi tous les coefficients de traînée utilisés**

Tableau A1-2 Les 168 simulations de calibration de TELEMAC 2D pour un  $C_D = 0.7 * 10^{-3}$ 

Coefficient de traînée (--)	Vitesse du vent (km/h)	Direction (deg.met)	RMSE/Direction (cm)	RMSE/Direction M0 * (cm)	RMSE/Vitesse (cm)	RMSE/Vitesse M0 * (cm)	RMSE/Traînée (cm)	RMSE M0 * (cm)
0.7 x 10-3	5	315-45	2.08	2.10	2.59	2.68	3.29	3.86
		45-135	3.05	3.26				
		135-225	2.58	2.62				
		225-315	2.11	2.06				
	10	315-45	2.35	2.43	3.15	3.33		
		45-135	4.40	4.85				
		135-225	3.20	3.29				
		225-315	2.48	2.64				
	15	315-45	2.46	2.71	3.29	3.61		
		45-135	5.57	6.55				
		135-225	3.56	3.62				
		225-315	2.88	3.41				
	20	315-45	3.45	3.94	3.46	4.14		
		45-135	6.28	7.82				
		135-225	3.55	3.56				
		225-315	3.24	4.41				
	25	315-45	3.65	4.64	3.81	5.02		
		45-135	7.13	9.51				
		135-225	3.40	3.16				
		225-315	3.96	5.67				
	30	315-45	4.56	6.04	4.57	6.42		
		45-135	8.82	12.96				
		135-225	4.38	4.12				
		225-315	4.59	7.17				

**Légende :**

\* M0 = Modèle nul, sans vent

**Meilleur score au RMSE parmi tous les coefficients de traînée utilisés**Tableau A1-3 Les 168 simulations de calibration de TELEMAC 2D pour un  $C_D = 1.0 * 10^{-3}$ 

Coefficient de traînée (--)	Vitesse du vent (km/h)	Direction (deg.met)	RMSE/Direction (cm)	RMSE/Direction M0 * (cm)	RMSE/Vitesse (cm)	RMSE/Vitesse M0 * (cm)	RMSE/Traînée (cm)	RMSE M0 * (cm)
1 x 10-3	5	315-45	2.07	2.10	2.56	2.68	<u>3.25</u>	3.86
		45-135	2.97	3.26				
		135-225	2.56	2.62				
		225-315	2.14	2.06				
	10	315-45	2.34	2.43	3.09	3.33		
		45-135	4.22	4.85				
		135-225	3.17	3.29				
		225-315	<u>2.47</u>	2.64				
	15	315-45	2.40	2.71	3.23	3.61		
		45-135	5.22	6.55				
		135-225	<u>3.55</u>	3.62				
		225-315	<u>2.83</u>	3.41				
	20	315-45	3.33	3.94	<u>3.38</u>	4.14		
		45-135	5.76	7.82				
		135-225	3.61	3.56				
		225-315	<u>3.11</u>	4.41				
	25	315-45	3.40	4.64	<u>3.76</u>	5.02		
		45-135	6.32	9.51				
		135-225	3.72	3.16				
		225-315	<u>3.93</u>	5.67				
	30	315-45	4.17	6.04	<u>4.48</u>	6.42		
		45-135	7.23	12.96				
		135-225	4.82	4.12				
		225-315	<u>4.54</u>	7.17				

**Légende :**

\* M0 = Modèle nul, sans vent

**Meilleur score au RMSE parmi tous les coefficients de traînée utilisés**

Tableau A1-4 Les 168 simulations de calibration de TELEMAC 2D pour un  $C_D = 1.2 * 10^{-3}$ 

Coefficient de traînée (--)	Vitesse du vent (km/h)	Direction (deg.met)	RMSE/Direction (cm)	RMSE/Direction M0 * (cm)	RMSE/Vitesse (cm)	RMSE/Vitesse M0 * (cm)	RMSE/Traînée (cm)	RMSE M0 * (cm)
1.2 x 10-3	5	315-45	2.07	2.10	2.54	2.68	3.28	3.86
		45-135	2.92	3.26				
		135-225	2.55	2.62				
		225-315	2.16	2.06				
	10	315-45	2.33	2.43	3.05	3.33		
		45-135	4.11	4.85				
		135-225	3.15	3.29				
		225-315	2.47	2.64				
	15	315-45	2.37	2.71	<u>3.22</u>	3.61		
		45-135	4.99	6.55				
		135-225	3.56	3.62				
		225-315	2.86	3.41				
	20	315-45	3.28	3.94	3.41	4.14		
		45-135	5.45	7.82				
		135-225	3.68	3.56				
		225-315	3.17	4.41				
	25	315-45	3.30	4.64	3.89	5.02		
		45-135	5.87	9.51				
		135-225	3.97	3.16				
		225-315	4.14	5.67				
	30	315-45	3.99	6.04	4.66	6.42		
		45-135	6.23	12.96				
		135-225	5.17	4.12				
		225-315	4.88	7.17				

**Légende :**

\* M0 = Modèle nul, sans vent

**Meilleur score au RMSE parmi tous les coefficients de traînée utilisés**Tableau A1-5 Les 168 simulations de calibration de TELEMAC 2D pour un  $C_D = 1.4 * 10^{-3}$ 

Coefficient de traînée (--)	Vitesse du vent (km/h)	Direction (deg.met)	RMSE/Direction (cm)	RMSE/Direction M0 * (cm)	RMSE/Vitesse (cm)	RMSE/Vitesse M0 * (cm)	RMSE/Traînée (cm)	RMSE M0 * (cm)
1.4 x 10-3	5	315-45	<b>2.06</b>	2.10	2.53	2.68	3.37	3.86
		45-135	2.87	3.26				
		135-225	2.55	2.62				
		225-315	2.19	2.06				
	10	315-45	<b>2.32</b>	2.43	3.02	3.33		
		45-135	4.00	4.85				
		135-225	3.13	3.29				
		225-315	2.50	2.64				
	15	315-45	<b>2.36</b>	2.71	3.23	3.61		
		45-135	4.79	6.55				
		135-225	3.57	3.62				
		225-315	2.94	3.41				
	20	315-45	<b>3.26</b>	3.94	3.48	4.14		
		45-135	5.19	7.82				
		135-225	3.77	3.56				
		225-315	3.32	4.41				
	25	315-45	<b>3.25</b>	4.64	4.12	5.02		
		45-135	5.50	9.51				
		135-225	4.25	3.16				
		225-315	4.52	5.67				
	30	315-45	<b>3.90</b>	6.04	5.00	6.42		
		45-135	5.31	12.96				
		135-225	5.58	4.12				
		225-315	5.45	7.17				

**Légende :**

\* M0 = Modèle nul, sans vent

**Meilleur score au RMSE parmi tous les coefficients de traînée utilisés**

Tableau A1-6 Les 168 simulations de calibration de TELEMAC 2D pour un  $C_D = 1.8 * 10^{-3}$ 

Coefficient de traînée (--)	Vitesse du vent (km/h)	Direction (deg.met)	RMSE/Direction (cm)	RMSE/Direction M0 * (cm)	RMSE/Vitesse (cm)	RMSE/Vitesse M0 * (cm)	RMSE/Traînée (cm)	RMSE M0 * (cm)
1.8 x 10-3	5	315-45	2.06	2.10	2.50	2.68	3.65	3.86
		45-135	2.77	3.26				
		135-225	2.53	2.62				
		225-315	2.25	2.06				
	10	315-45	2.33	2.43	2.99	3.33		
		45-135	3.80	4.85				
		135-225	3.11	3.29				
		225-315	2.58	2.64				
	15	315-45	2.38	2.71	3.30	3.61		
		45-135	4.43	6.55				
		135-225	3.62	3.62				
		225-315	3.20	3.41				
	20	315-45	3.28	3.94	3.77	4.14		
		45-135	4.81	7.82				
		135-225	3.97	3.56				
		225-315	3.87	4.41				
	25	315-45	3.32	4.64	4.82	5.02		
		45-135	5.04	9.51				
		135-225	4.85	3.16				
		225-315	5.57	5.67				
	30	315-45	3.96	6.04	6.03	6.42		
		45-135	3.82	12.96				
		135-225	6.44	4.12				
		225-315	7.00	7.17				

**Légende :**

\* M0 = Modèle nul, sans vent

**Meilleur score au RMSE parmi tous les coefficients de traînée utilisés**Tableau A1-7 Les 168 simulations de calibration de TELEMAC 2D pour un  $C_D = 2.8 * 10^{-3}$ 

Coefficient de traînée (--)	Vitesse du vent (km/h)	Direction (deg.met)	RMSE/Direction (cm)	RMSE/Direction M0 * (cm)	RMSE/Vitesse (cm)	RMSE/Vitesse M0 * (cm)	RMSE/Traînée (cm)	RMSE M0 * (cm)
2.8 x 10-3	5	315-45	2.07	2.10	2.45	2.68	4.84	3.86
		45-135	2.57	3.26				
		135-225	2.50	2.62				
		225-315	2.44	2.06				
	10	315-45	2.38	2.43	<u>2.98</u>	3.33		
		45-135	3.38	4.85				
		135-225	<u>3.07</u>	3.29				
		225-315	2.96	2.64				
	15	315-45	2.61	2.71	3.77	3.61		
		45-135	<u>3.89</u>	6.55				
		135-225	3.82	3.62				
		225-315	4.31	3.41				
	20	315-45	3.69	3.94	5.02	4.14		
		45-135	<u>4.79</u>	7.82				
		135-225	4.66	3.56				
		225-315	5.95	4.41				
	25	315-45	4.23	4.64	7.29	5.02		
		45-135	5.83	9.51				
		135-225	6.55	3.16				
		225-315	9.00	5.67				
	30	315-45	5.26	6.04	9.54	6.42		
		45-135	5.00	12.96				
		135-225	8.86	4.12				
		225-315	11.80	7.17				

**Légende :**

\* M0 = Modèle nul, sans vent

**Meilleur score au RMSE parmi tous les coefficients de traînée utilisés**

Tableau A1-8 Les 168 simulations de calibration de TELEMAC 2D pour un  $C_D = 3.7 * 10^{-3}$ 

Coefficient de traînée (--)	Vitesse du vent (km/h)	Direction (deg.met)	RMSE/Direction (cm)	RMSE/Direction M0 * (cm)	RMSE/Vitesse (cm)	RMSE/Vitesse M0 * (cm)	RMSE/Trainée (cm)	RMSE M0 * (cm)
3.7 x 10-3	5	315-45	2.09	2.10	<b><u>2.44</u></b>	2.68	6.20	3.86
		45-135	2.43	3.26				
		135-225	2.49	2.62				
		225-315	2.65	2.06				
	10	315-45	<b><u>2.49</u></b>	2.43	3.09	3.33		
		45-135	3.14	4.85				
		135-225	3.07	3.29				
		225-315	3.46	2.64				
	15	315-45	2.98	2.71	4.42	3.61		
		45-135	3.92	6.55				
		135-225	4.09	3.62				
		225-315	5.55	3.41				
	20	315-45	4.36	3.94	6.46	4.14		
		45-135	5.80	7.82				
		135-225	5.41	3.56				
		225-315	8.12	4.41				
	25	315-45	5.56	4.64	9.84	5.02		
		45-135	8.12	9.51				
		135-225	8.15	3.16				
		225-315	12.39	5.67				
	30	315-45	7.18	6.04	13.09	6.42		
		45-135	9.33	12.96				
		135-225	11.15	4.12				
		225-315	16.43	7.17				

**Légende :**

\* M0 = Modèle nul, sans vent

**Meilleur score au RMSE parmi tous les coefficients de traînée utilisés**Tableau A1-9 Les 168 simulations de calibration de TELEMAC 2D pour un  $C_D = 4.7 * 10^{-3}$ 

Coefficient de traînée (--)	Vitesse du vent (km/h)	Direction (deg.met)	RMSE/Direction (cm)	RMSE/Direction M0 * (cm)	RMSE/Vitesse (cm)	RMSE/Vitesse M0 * (cm)	RMSE/Traînée (cm)	RMSE M0 * (cm)
4.7 x 10-3	5	315-45	2.13	2.10	2.47	2.68	7.82	3.86
		45-135	2.34	3.26				
		135-225	2.49	2.62				
		225-315	2.90	2.06				
	10	315-45	2.67	2.43	3.30	3.33		
		45-135	3.03	4.85				
		135-225	3.12	3.29				
		225-315	4.10	2.64				
	15	315-45	3.52	2.71	5.28	3.61		
		45-135	4.49	6.55				
		135-225	4.47	3.62				
		225-315	7.04	3.41				
	20	315-45	5.30	3.94	8.20	4.14		
		45-135	7.55	7.82				
		135-225	6.31	3.56				
		225-315	10.62	4.41				
	25	315-45	7.26	4.64	12.77	5.02		
		45-135	11.29	9.51				
		135-225	9.96	3.16				
		225-315	16.23	5.67				
	30	315-45	9.59	6.04	17.14	6.42		
		45-135	14.56	12.96				
		135-225	13.74	4.12				
		225-315	21.63	7.17				

**Légende :**

\* M0 = Modèle nul, sans vent

**Meilleur score au RMSE parmi tous les coefficients de traînée utilisés**

Tableau A1-10 Les 56 simulations de calibration de TELEMAC 2D pour un  $C_D = 5.7 * 10^{-3}$ 

Coefficient de traînée (--)	Vitesse du vent (km/h)	Direction (deg.met)	RMSE/Direction (cm)	RMSE/Direction M0 * (cm)	RMSE/Vitesse (cm)	RMSE/Vitesse M0 * (cm)	RMSE/Traînée (cm)	RMSE M0 * (cm)
5.7 x 10-3	5	315-45	2.19	2.10	2.53	2.68	N.D	N.D
		45-135	<u>2.31</u>	3.26				
		135-225	2.50	2.62				
		225-315	3.18	2.06				
	10	315-45	2.57	2.43	3.17	3.33		
		45-135	<u>3.03</u>	4.85				
		135-225	3.06	3.29				
		225-315	3.79	2.64				

**Légende :**

\* M0 = Modèle nul, sans vent

**Meilleur score au RMSE parmi tous les coefficients de traînée utilisés**Tableau A1-11 Les 56 simulations de calibration de TELEMAC 2D pour un  $C_D = 6.7 * 10^{-3}$ 

Coefficient de traînée (--)	Vitesse du vent (km/h)	Direction (deg.met)	RMSE/Direction (cm)	RMSE/Direction M0 * (cm)	RMSE/Vitesse (cm)	RMSE/Vitesse M0 * (cm)	RMSE/Traînée (cm)	RMSE M0 * (cm)
6.7 x 10-3	5	315-45	2.26	2.10	2.62	2.68	N.D	N.D
		45-135	2.34	3.26				
		135-225	2.52	2.62				
		225-315	3.47	2.06				
	10	315-45	2.71	2.43	3.36	3.33		
		45-135	3.07	4.85				
		135-225	3.10	3.29				
		225-315	4.27	2.64				

**Légende :**

\* M0 = Modèle nul, sans vent

**Meilleur score au RMSE parmi tous les coefficients de traînée utilisés**

## ANNEXE 2 – Régression non paramétrique à une variable explicative – Outardes 4

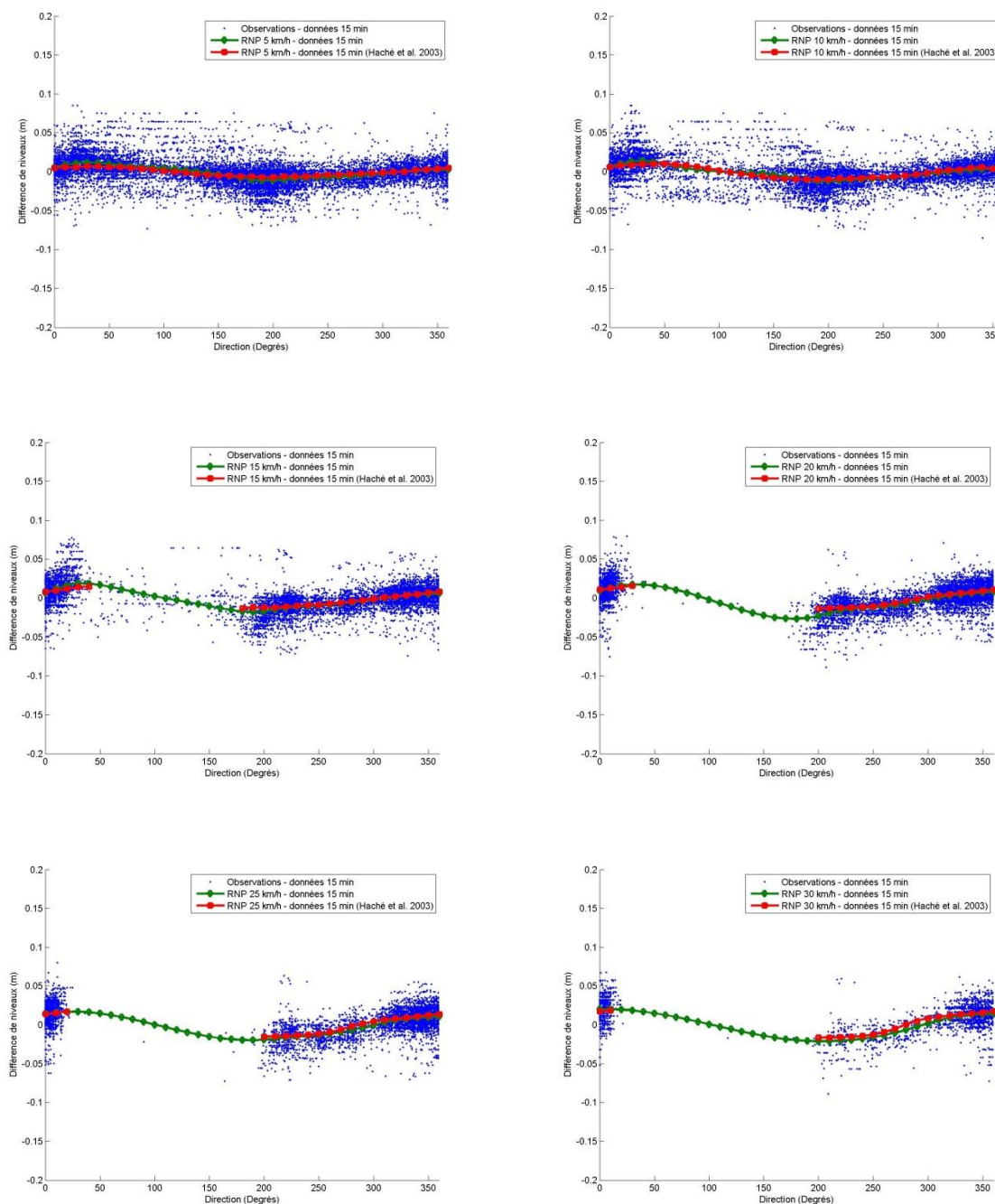


Figure A2-1 Mise à jour des RNP à une variable explicative pour estimer les différences de niveaux entre les instruments Sud - Nord -- Outardes 4

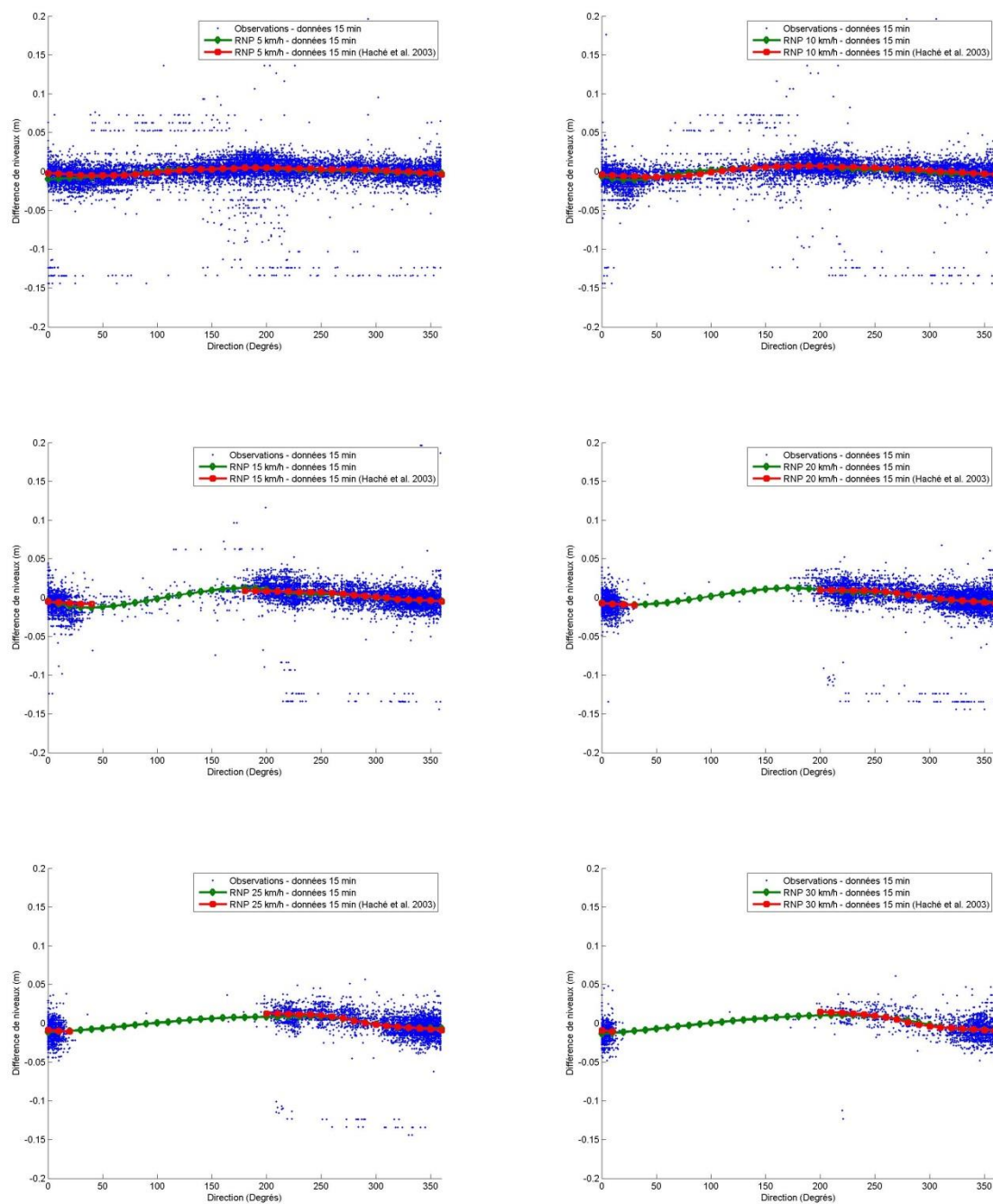


Figure A2-2 Mise à jour des RNP à une variable explicative pour estimer les différences de niveaux entre les instruments Sud - Centrale -- Outardes 4