AMÉLIORATION DES LOIS DE COMPORTEMENT DU VENT DANS LE MODÈLE H2D2

Application sur le lac Champlain

Remis à Environnement Canada

Réalisé par

Yves SECRETAN

Mouna DOGHRI

Institut National de la Recherche Scientifique (INRS-ETE) Centre Eau Terre et Environnement 490, rue de la Couronne Québec (QC), Canada G1K 9A9

Rapport N° R1701

Mars 2016

Copyright © 2016 INRS

© INRS, Centre - Eau Terre Environnement, 2016 Dépôt légal, Bibliothèque nationale du Québec Dépôt légal, Bibliothèque et archives Canada ISBN : 978-2-89146-871-8

Table des matières

Liste de	s figures	V
Liste de	s Tableaux	vii
Somma	re	9
1. Pro	blématique	
2. Re	vue des modèles de vent	
3. Mo	dèles de vent implantés dans H2D2	
4. Site	e d'étude	
4.1.	Données mises en disposition	
4.2.	Analyse des données de vent	
4.3.	Conditions aux limites	
4.4.	Analyse des données des niveaux d'eau observés	
5. Pro	otocole de simulations	
5.1.	Simulations stationnaires	29
5.2.	Simulations non stationnaires	
6. An	alyse des résultats	
6.1.	Impact du choix de la fonction de vent	
6.2.	Confrontation aux mesures : comparaison des écarts	
6.3.	Sensibilité aux paramètres du modèles	
6.3.1	Influence de la longueur de mélange	
6.3.2	Choix du pas de temps	45
6.3.3	Influence du Peclet	
6.3.4	Synthèse de l'analyse de sensibilité	47
Conclus	ions et perspectives	49
Référen	ces bibliographiques	

Liste des figures

Figure 1. Ajustement linéaire (trait pointillé) de la fonction du coefficient de trainée C_d en	
fonction du paramètre Y (trait plein) (adaptée de Guan <i>et al.</i> (2004))	12
Figure 2. Enveloppe des valeurs extrêmes du coefficient C_d obtenue avec les formulations	
linéaires	14
Figure 3. Présentation graphique des fonctions du vent sélectionnées	17
Figure 4. Conditions limites (localisation géographique)	21
Figure 5. Conditions aux limites du lac : Condition de niveau d'eau en aval (tracé d'en haut) et	
débits d'entrée à l'amont (tracés d'en bas)	22
Figure 6. Variation horaire des niveaux d'eau sur le Lac Champlain au niveau des stations de	
mesures	24
Figure 7. Variation horaire des niveaux d'eau et évènements de forts vents sur le Lac Champlai	in
(mai-juin 2015)	25
Figure 8. Traitement du signal des niveaux d'eau mesurés	26
Figure 9. Localisation des sondes sur le lac Champlain	28
Figure 10. Niveaux d'eau observés et simulés	31
Figure 11. Niveaux d'eau dans la station de Rouses Point (événement 1&2)	32
Figure 12. Niveaux d'eau à l'événement 5 dans Rouses Point (en haut) et Burlington (en bas)	33
Figure 13. Scatter plot des écarts (m) entre les simulations 1 et 2. La couleur est indexée sur le	S
normes des vitesses de vent	34
Figure 14. Scatter plot des écarts (m) entre les simulations 2 et 3	35
Figure 15. Scatter plot des écarts (m) entre les simulations 1 et 3	36
Figure 16. Scatter plot des écarts (m) entre les simulations 2 et 4	37
Figure 17. Signal des observations VS Simulation 1	39
Figure 18. Signal des observations VS Simulation 2	40
Figure 19. Signal des observations VS Simulation 3	41
Figure 20. Signal des observations VS Simulation 4	42
Figure 21. Scatter plot des écarts : Observations VS. Simulation 4	43
Figure 22. Scatter plot des simulations avec différentes longueurs de mélange (Im)	44
Figure 23. Scatter plot des simulations 4 VS. 6	45
Figure 24. Scatter plot des simulations 4 VS. 7	46

Liste des Tableaux

Tableau 1. Paramètres de la formulation linéaire entre C_d et U_{10} (adapté de Guan <i>et al.</i> (2004))	13
Tableau 2. Paramètres de la forme quadratique (adapté de Kumar <i>et al.</i> (2009))	15
Tableau 3. Modèle du lac Champlain : ensemble des fichiers fournis	19
Tableau 4. Événements avec fortes vitesses de vent sur le Lac Champlain	20
Tableau 5. Amplitudes maximales (en cm) des niveaux d'eau lors des événements de vent	27
Tableau 6. Simulations réalisées sur le lac Champlain	30
Tableau 7. Amplitudes des niveaux d'eau (cm) : Simulations VS. Observations	38

Sommaire

Dans H2D2, les contraintes de surface dues au vent sont modélisées via un coefficient de friction C_d . Différentes formulations pour C_d existent dans la littérature. Suite à une revue de la littérature, des choix sont faits et les différentes formulations retenues sont implantées dans H2D2, donnant ainsi au modélisateur des alternatives.

Une analyse comparative des formulations implantées est réalisée, avec le lac Champlain comme site test.

La comparaison des résultats des simulations avec les niveaux d'eau observés ne s'est pas révélée possible car au moment du projet, le modèle du lac Champlain n'était pas complétement étalonné et présentait encore des écarts systématiques importants avec les mesures.

Une comparaison entre différentes formulations de vent implémentées dans *H2D2* est réalisée, avec pour objectif de comparer la réponse aux différents événements de vent. A défaut de comparer les niveaux avec les mesures, une comparaison des écarts par rapport au niveau lissé est proposée.

La comparaison avec les contraintes de surface issues des modèles atmosphériques utilisés aux opérations au CMC n'a pas été réalisée par manque de données.

1. Problématique

Plusieurs travaux se sont intéressés à l'étude de l'effet du vent à la surface de l'eau et ont tenté d'établir des relations qui expriment la contrainte du vent sur la surface de l'eau en fonction du coefficient de traînée (C_d) ou de la rugosité de la surface aérodynamique (z_0). De nombreuses équations pour C_d existent dans la littérature. Il s'agit de formulations empiriques développées à la base de données observées dans différents sites. Suite à une revue de la littérature, des choix sont faits et les différentes formulations retenues sont implantés dans *H2D2*, donnant ainsi au modélisateur des alternatives.

Les simulations du Lac Champlain, vont permettre de déterminer l'impact des différentes formules retenues sur les niveaux d'eau simulés, et de comparer les résultats issus du modèle *H2D2* avec les niveaux d'eau observées.

2. Revue des modèles de vent

La variation de coefficient de traînée avec la vitesse du vent à 10 mètres de la surface de l'eau a bien été mise en avant dans plusieurs études (p. ex Wu (1969), Guan *et al.* (2004), Kumar *et al.* (2009), etc.) et différentes expressions sont suggérées dans la littérature.

C'est principalement la combinaison entre le profil logarithmique du vent et de la relation de Charnock, qui exprime la rugosité en fonction de la vitesse de cisaillement et de l'accélération gravitationnelle, qui permet d'aboutir à la relation de dépendance du coefficient de trainée avec la vitesse du vent (Wu, 1980). Ces relations de base sont :

1) le profil logarithmique de la vitesse du vent :

$$u(z) = \frac{u_*}{k} ln\left(\frac{z}{z_0}\right),$$

2) la relation de Charnock (1955) :

$$z_0 = \frac{\alpha \, u_*^2}{g}$$

оù

- z est la hauteur d'eau,
- z₀ est la surface de rugosité,
- *u*_{*} est la vitesse de cisaillement :

$$u_*^2 = C_d U_{10}^2$$

- *k* est la constante de von Karman (égale à 0.4),
- g est l'accélération gravitationnelle,
- *α* est le coefficient de Charnock, il est compris entre 0.01 et 0.035 (Garratt *et al.*, 1996).

Des équations empiriques exprimant le coefficient C_d en fonction de la vitesse à 10m au-dessus de l'eau (U_{10}) sont suggérées. On distingue trois formes de relations pour le C_d :

1) Forme linéaire

Comme illustré dans Guan *et al.* (2004) et annoncé par Makin *et al.* (1995), la relation entre le coefficient de traînée (C_d) et la vitesse du vent mesurée à 10 mètres (U_{10}) peut être ajustée adéquatement par des régressions linéaires notamment pour des vitesses de vent entre 7 et 20m/s.



Figure 1. Ajustement linéaire (trait pointillé) de la fonction du coefficient de trainée C_d en fonction du paramètre Y (trait plein) (adaptée de Guan *et al.* (2004))

Dans ce cas, le coefficient C_d est exprimé comme suit :

$$C_d = (a + bU_{10}) * 10^{-3}$$

avec *a* et *b* des paramètres de régression déterminés à partir des données observées sur le terrain. Dans le Tableau 1, les différentes valeurs proposées dans la littérature pour ces deux paramètres sont présentées (Guan *et al.*, 2004).

La Figure 1 illustre l'ajustement, avec la fonction linéaire (trait pointillé), de la relation entre le coefficient C_d est Y (avec $Y = \alpha^{1/2}U$) (trait plein). La forme linéaire est démontrée théoriquement, dans cette étude, pour des valeurs de C_d entre 10⁻³ et 4*10⁻³.

Il est à noter que :

- la pente de la fonction linéaire est proportionnelle à la racine carrée du coefficient de Charnock (Guan *et al.*, 2004),
- la relation linéaire n'est adéquate que pour une gamme de valeur de C_d (entre 10^{-3} et $4*10^{-3}$),
- cette approximation sous-estime les faibles valeurs du coefficient (< 10⁻³) et surestime les fortes valeurs.

Auteurs	а	<i>b</i> (m⁻¹s)	
Sheppard (1958)	0.8	0.114	
Deacon and Webb (1962)	1.0	0.07	
Miller (1964)	0.75	0.067	
Zubkovskii and Kravchenko (1967)	0.72	0.12	
Brocks and Krugermeyer (1970)	1.18	0.016	
Sheppard et al. (1972)	0.36	0.1	
Wieringa (1974)	0.86	0.058	
Kondo (1975)	1.2	0.025	
Smith and Banke (1975)	0.61	0.075	
Smith (1980)	0.61	0.063	
Wu (1980)	0.8	0.065	
Donelan (1982)	0.96	0.041	
Geernaert (1987)	0.5777	0.0847	
Yelland and Taylor (1996)	0.60	0.07	

Tableau 1. Paramètres de la formulation linéaire entre C_d et U_{10} (adapté de Guan *et al.* (2004))

Moyenne	0.7877	0.0692
Variance	0.0566	8.9054 10 ⁻⁴
Étendue	0.84	0.104

Il ressort du Tableau 1 que même si les variances des paramètres semblent être relativement faibles, leurs étendues révèlent une certaine dispersion. Effectivement, la représentation graphique de l'enveloppe (min et max) des valeurs possibles du coefficient C_d (Figure 2), pour une gamme de vitesse de vent de 0 à 30m/s, révèle une variabilité notable entre les formulations notamment pour les vitesses de vents élevées (> 15m/s). C'est principalement le choix du coefficient de Charnock, donc de la pente, qui diffère d'une étude à l'autre, qui est à l'origine de cette variabilité.



Figure 2. Enveloppe des valeurs extrêmes du coefficient C_d obtenue avec les formulations linéaires.

2) Forme exponentielle

Wu (1980) affirme que ce type de relations est convenable d'un point de vue pratique et un nombre d'études qui proposent cette forme sont listées dans son article. C'est en partant des mêmes relations de base et en admettant que la constante de Charnock (α) dépend de l'âge de la vague ($\beta = \frac{c_p}{u_*}$) que cette forme de relation est obtenue (Kumar *et al.* (2009); Taylor *et al.* (2001); Makin *et al.* (1995)). Elle est comme suit :

$$C_d = a * U_{10}^n * 10^{-3}$$

où *a* et *n* sont des paramètres de régression.

La forme exponentielle de la relation entre le coefficient C_d et la vitesse U_{10} ressort de l'ajustement de l'expression suivante:

$$f\left(\frac{c_p}{u_*}\right) = a_1(\beta)^m$$

 a_1 et *m* sont des coefficients déterminés à la base d'observations de terrain et d'essais en laboratoire.

3) Régression polynomiale

Kumar *et al.* (2009) et Taylor *et al.* (2001) ajustent une forme polynomiale entre le coefficient de trainée et la vitesse du vent à 10 mètres sur les séries des données observées. Les résultats de l'ajustement montrent une bonne performance du modèle pour toutes les gammes du coefficient (pour des vagues jeunes et matures). La forme quadratique adoptée est :

$$C_d = a + b * U_{10} + c * U_{10}^2$$

avec *a*, *b* et *c* des paramètres ajustés sur les observations. Dans l'étude Kumar *et al.* (2009), celle qui est adaptée pour le cas des lacs, les valeurs suivantes sont données au Tableau 2 :

Âge des vagues	<i>a</i> (10 ⁻⁴)	<i>b</i> (10 ⁻⁵)	<i>c</i> (10 ⁻⁶)
$\frac{c_p}{u_*} < 15$	5.97	10.1	2.55
$15 < \frac{c_p}{u_*} < 20$	5.18	7.74	3.59
$20 < \frac{c_p}{u_*} < 25$	6.09	6.37	2.95
$\frac{c_p}{2}$ >25	8.12	-1.72	9.06

Tableau 2. Paramètres de la forme quadratique (adapté de Kumar et al. (2009))

Kumar *et al.* (2009) montrent que :

- les deux formes d'expression de C_d (linéaire et quadratique) présentent des résultats similaires seulement pour le cas des jeunes vagues ;
- l'expression linéaire fournie par Guan *et al.* (2004) a tendance à surestimer le coefficient de trainée dans le cas des vagues matures ;
- c'est la régression polynomiale qui donne les meilleurs résultats pour les différents cas possibles.

3. Modèles de vent implantés dans H2D2

On se propose dans cette étude de comparer, en première phase, les résultats issus de différents types de formulations proposées dans la littérature. Par la suite, une sélection de formulations sera adoptée et implémentée dans *H2D2*.

C'est la formulation d'Hydrosim qui est la première implantée dans H2D2. Le coefficient C_d est défini ainsi :

• Wu (1969)

$$C_{d} = \begin{cases} 1.25 * U_{10}^{-\frac{1}{5}} * 10^{-3} & ; \text{ Brise} : U_{10} < 1m/s \\ \frac{1}{0.5 * U_{10}^{2}} * 10^{-3} & ; \text{ Vent faible} : 1 m/s < U_{10} < 15 m/s \\ 2.6 * 10^{-3} & ; \text{ Vent fort} : U_{10} > 15 m/s \end{cases}$$

Deux lois moyennes sont aussi sélectionnées, il s'agit de :

• Wu (1980)

$$C_d = (0.8 + 0.065 U_{10}) * 10^{-3}$$

• Smith (1980)

$$C_d = (0.61 + 0.063 \, U_{10}) * 10^{-3}$$

Les deux lois considérées pour le contrôle des valeurs extrêmes sont :

• Sheppard (1958)

$$C_d = (0.8 + 0.114 U_{10}) * 10^{-3}$$

• Kondo (1975)

$$C_d = (1.2 + 0.025 U_{10}) * 10^{-3}$$

Finalement, les lois proposées par Kumar *et al.* (2009) qui tiennent compte de l'âge des vagues sont aussi intégrées. Par la suite, ces formules seront nommées juste Kumar (2009).

Au total neuf formulations sont implémentées dans *H2D2*. Au niveau de la Figure 3, la sélection des formules est présentée. Elles sont disponibles avec les éléments Y3 et Y4 comme propriété globale. Il s'agit de :

- 1. Wu (1969)
- 2. Wu (1980)
- 3. Smith (1980)
- 4. Sheppard (1958)
- 5. Kondo (1975)
- 6. Kumar (2009) wa1¹
- 7. Kumar (2009) wa2
- 8. Kumar (2009) wa3
- 9. Kumar (2009) wa4



Figure 3. Présentation graphique des fonctions du vent sélectionnées

On constate à partir de la Figure 3, pour des vitesses du vent inférieurs à 30 m/s, que :

- Pour les forts vents :
 - les écarts entre les différents modèles sont plus prononcés,
 - les formulations de Kumar (2009), pour le cas des vagues jeunes et matures, génèrent les valeurs de C_d les plus élevées,
 - Kondo (1975) donne les coefficients les plus faibles,

¹ wa (wave age) : âge des vagues

- les valeurs issues de Sheppard (1958) s'ajustent au milieu de la gamme des valeurs obtenues,
- Wu (1969) propose une valeur seuil de 2.6 10^{-3} .
- Pour le cas du brise (vents faibles <1m/s) :
 - la plupart des formulations génèrent des valeurs qui ne dépassent pas 10⁻³,
 - Kondo (1975) donne les valeurs les plus élevés,
 - le modèle de Wu (1969), qui présente une discontinuité à 1m/s de vitesse de vent, génère des valeurs de C_d un peu plus élevées qui se rapprochent de ceux issues de Kondo (1975).
- Pour les vitesses intermédiaires du vent (entre 3 et 8 m/s) :
 - Sheppard (1958) et Smith (1980) constituent l'enveloppe des valeurs obtenues, la limite maximale et la limite minimale respectivement,
 - les différents modèles restants génèrent des valeurs relativement proches pour cet intervalle étroit de vitesses de vent.

Les deux formes linéaires de Wu(1980) et Smith (1980) présentent une différence relativement faible, les pentes des droites, autrement dit les coefficients de Charnock considérés, sont assez proches.

Cette comparaison reste théorique, c'est suite à la confrontation avec des observations réelles qu'on va pouvoir conclure sur la performance de ces modèles. Cependant, Taylor *et al.* (2001) affirment qu'aucune formulation n'est capable de s'ajuster parfaitement sur l'ensemble des données observées.

4. Site d'étude

Le site d'étude est le lac Champlain. Le modèle numérique de terrain et les données sont fournis par Environnement Canada.

4.1. Données mises en disposition

Le modèle du lac Champlain fourni par Environnement Canada est composé par les fichiers listés dans le Tableau 3.

Type de données	Nom du fichier			
Maillage éléments finis	LAKE_CHAMPLAIN_26022016.cor			
	LAKE_CHAMPLAIN_26022016.ele			
Cotes du fond	LAKE_CHAMPLAIN_26022016.bathy			
Coefficient de Manning	LAKE_CHAMPLAIN_26022016.man			
Fichiers de vents ²	'*'.vnt			
Conditions limites	LAKE_CHAMPLAIN_26022016.bnd			
conditions innites	LakeChamplain2015.cnd			
Hauteurs d'eau mesurées	Probes.cfg			
	WaterLevel_LC.txt			

Tableau 3. Modèle du lac Champlain : ensemble des fichiers fournis

4.2. Analyse des données de vent

La série horaire des composantes du vent (à 10 mètres de la surface), s'étale sur une période de deux mois, du 10/04/2015 au 14/06/2015. Une étude statistique, sur un total de 483351264 valeurs de module du vent, donne :

- moyenne : 3.38 m/s
- maximum : 15.88 m/s
- minimum : 0.00 m/s

Les événements de forts vents, fournis par Environnement Canada, durant la période d'intérêt sont listés dans le Tableau 4.

² Au total, 1250 fichiers de vent sont fournis.

Événement	Début	Vent maximal (m/s)	
1 & 2 ³	16 avril 2015 00:00:00	21 avril 2015 00:00	9.3
3	11 mai 2015 00:00:00	15 mai 2015 00:00	9.17
4	17 mai 2015 00:00:00	22 mai 2015 00:00	7.86
5	28 mai 2015 00:00:00	01 juin 2015 00:00	10.46
6	03 juin 2015 00:00:00	10 juin 2015 00:00	9.76

Tableau 4. Événements avec fortes vitesses de vent sur le Lac Champlain

4.3. Conditions aux limites

Les conditions limites (CL) fournies au modèle (localisé dans la Figure 4) sont comme suit :

- les niveaux d'eau à sa limite aval : Fryers,
- Les débits d'entrée à l'amont ainsi qu'aux différents endroits le long du secteur à l'étude : Chazy, Missisquoi⁴, Lamoille, Saranac, Au Sable, Winooski, Bouquet, Otter, Lachute, Poultney et Whitehall.

La dynamique annuelle des niveaux d'eau à la limite aval du lac ainsi que les débits des principaux affluents sont illustrés à la Figure 5. On constate que le système du lac Champlain présente globalement un même comportement : les pics et les dépressions sont bien synchrones même si les fluctuations ne sont pas du même ordre de grandeur. On note que les plus grands apports au lac viennent de la rive gauche par les tributaires Otter, Winooski et Missisquoi.

³ Il semble que le début de l'événement 1&2 soit le 11 avril

⁴ Identifié comme Missiquoi dans les fichiers



Figure 4. Conditions limites (localisation géographique)



Figure 5. Conditions aux limites du lac : Condition de niveau d'eau en aval (tracé d'en haut) et débits d'entrée à l'amont (tracés d'en bas).

Les événements de vents sont limités par les traits jaunes.

4.4. Analyse des données des niveaux d'eau observés

Des mesures de hauteur d'eau observées, au pas de 15 minutes, couvrent la période du 01/01/2015 au 03/12/2015.

La Figure 6 présente la dynamique horaire de variation des niveaux d'eau. Il en ressort que :

- suite à la période hivernale présentée par le creux (niveau qui atteint au minimum 28.7m) dans la Figure 6, les niveaux d'eau remontent rapidement,
- la période estivale présente deux pics des niveaux d'eau : le 1^{er} au mois d'avril (aux alentours de 29.7m) et le 2nd en début de juillet (d'environ 29.9m),
- les niveaux d'eau baissent graduellement par la suite jusqu'à atteindre un niveau bas (d'environ 28.7m) vers le mois d'octobre.

Les niveaux d'eau centrés sur la période d'intérêt dans cette étude (la période pour laquelle on a des données de vent sur le lac) ainsi que les événements de forts vents sont illustrés dans la Figure 7. On en déduit que :

- Whitehall présente les perturbations des niveaux d'eau les plus notables de toutes les stations. Ces variations, intenses tout le long de l'année, ne sont pas vraisemblablement causées par le vent seulement.
- Il en est de même pour les autres stations : les pics des niveaux d'eau qui apparaissent au milieu des événements (p.ex. Philipsburg et Rouses Point aux événements de 4 à 6; Port Henry à l'événement 6 etc.) et les chutes des niveaux en plein événement (p.ex Burlington et Rouses Point pour les événements 5 et 6 respectivement) laissent à penser que les perturbations des niveaux d'eau dans le système du Lac Champlain sont influencées par d'autres facteurs en plus du vent.

D'après Fortin et al. (2015), Whitehall présente bien un comportement différent, par rapport aux autres stations, qui s'explique autrement que par le vent.



Figure 6. Variation horaire des niveaux d'eau sur le Lac Champlain au niveau des stations de mesures



Figure 7. Variation horaire des niveaux d'eau et évènements de forts vents sur le Lac Champlain (mai-juin 2015)



Figure 8. Traitement du signal des niveaux d'eau mesurés

Dans le but de séparer l'effet du vent sur la variation des niveaux d'eau et de déterminer les amplitudes maximales atteintes durant les différents événements, l'influence du débit et des fluctuations à long terme est soustraite du signal instantané. Pour cela, un lissage par moyenne mobile est réalisé pour chaque station de mesure. La fenêtre utilisée est de 4 jours. Le signal lissé obtenu est ensuite soustrait du signal brut des niveaux d'eau pour obtenir les écarts. Les amplitudes sont calculées par détection des pics (positifs et négatifs) sur les écarts. Les résultats de ces opérations sont présentés à la Figure 8 et résumés dans le Tableau 5 :

- Whitehall présente les valeurs maximales, suivie par Rouses Point et Philipsburg,
- c'est au cours des événements n°5 et 6 que les amplitudes maximales sont enregistrées au niveau des différentes stations.

Événement	Stations de suivi (amplitudes en cm)							
	RousesPoint	Burlington	Grandelsle	PortHenry	Whitehall	Philipsburg		
1&2	14.4 -		10.7	13.3	37	10.3		
3	10.9	8.4	6	11.1	29.3	20.1		
4 12.4		9	2.9	8.6	23.1	12		
5 25		4.6	7.5	16.3	46.4	15.1		
6	21.4	8.2	4	18.1	44.2	23.2		

Tableau 5. Amplitudes maximales (en cm) des niveaux d'eau lors des événements de vent

5. Protocole de simulations

On se propose de réaliser des simulations qui englobent la période du 2015-04-10 au 2015-06-15 et de comparer les niveaux d'eau obtenus avec différentes formulations du vent. Les niveaux seront comparés en neuf sondes implémentées dans *H2D2*, et qui sont présentées à la Figure 9.



Figure 9. Localisation des sondes sur le lac Champlain

Les sondes utilisées dans cette analyse ne correspondent pas exactement aux sondes indiquées dans la section 5. Dans le fichier fourni par Environnement Canada, les sondes sont identifiées

non pas par la coordonnée géographique mais par le numéro de nœud sur le maillage original. Dans le passage au maillage modifié, une erreur de 1 a été faite sur le numéro de nœud. Après contrôle, ces nouvelles positions sont très proches des « vraies » positions et les signaux ne présentent pas de différence significative.

Dans Wu (1980), un intérêt est porté à la mise en avant de la dépendance du coefficient C_d en fonction non seulement de la vitesse du vent (U_{10}) mais aussi du fetch. Sur cette base, les sondes vont générer des signaux de niveau d'eau différents et influencés à la fois par la vitesse du vent et le fetch. Avec un vent dont la direction est principalement SW, on s'attend à avoir les vagues les plus hautes et les plus grandes amplitudes au niveau de Burlington, Philipsburg, Rouses Point, Whitehall et Saint-Jean. Toutefois, dans le modèle, la station Whitehall est très proche de la condition limite amont et est certainement sous son influence. En plus, Fortin *et al.* (2015) analysent que :

- i) pour la station de Burlington, les fluctuations du niveau d'eau sous l'effet du vent ne sont pas généralement grandes,
- ii) la station de Philipsburg (comme Grand Isle) est localisée dans une zone du lac Champlain qui n'est reliée à la partie principale que par des chenaux étroits et où les niveaux peuvent donc être différents et,
- iii) Whitehall est située dans un chenal très étroit et présente une influence importante qui ne se justifie pas seulement par l'effet du vent (Fortin *et al.*, 2015).

5.1. Simulations stationnaires

Des simulations stationnaires ont été conduites avec les conditions du 2015-03-26 et du 2015-11-15, qui correspondent respectivement à la fin du plateau des niveaux et débits hivernaux et au plateau automnal. Ces simulations font ressortir des écarts encore importants avec les mesures (Figure 10), écarts qui proviennent du modèle qui n'est pas complètement étalonné. En conséquence, il ne sera pas possible de comparer directement les simulations et les mesures. Nous proposerons néanmoins deux analyses qui restent valide :

• la comparaison des simulations entre elles,

• la comparaison des écarts entre le signal brut et un signal lissé par moyenne mobile, ce qui revient à comparer les écarts induits par le vent.

5.2. Simulations non stationnaires

Au total, sept simulations sont effectuées en calcul non stationnaire⁵. Elles sont décrites dans le Tableau 6. Les quatre premières simulations diffèrent en termes de fonction de vent et les trois autres permettent d'évaluer l'impact du choix de longueur de mélange (simulation n°5), du pas de temps de calcul (simulation n°6) et du Peclet, (simulation n°7) sur la convergence de la solution numérique.

Simulation n°	Fonction de vent	Pas du calcul	Coefficient de longueur de mélange	Peclet	Nom du répertoire
1	#2- Wu (1980)	15 min	2	1	sim_fct2bis
2	#4- Sheppard (1958)	15 min	2	1	sim_ fct 4bis
3	#5- Kondo (1975)	15 min	2	1	sim_ fct 5bis
4		15 min	2	1	#6
5	#6- Kumar (2009)	15 min	1	1	#6bis
6	cas vagues jeunes	1 heure	2	1	#6ter
7		30 min	1	1.5	#6quater

Tableau 6. Simulations réalisées sur le lac Champlain

La solution stationnaire adoptée pour démarrer ces simulations est celle conduite avec les conditions du 2015-03-26. Comme le lac subit, en début de Mai, une montée rapide des niveaux d'eau, on suppose que le modèle numérique du lac sur *H2D2* a le temps de se stabiliser et on aura une meilleure convergence numérique de la solution à chaque pas de temps.

Une vidéo de la simulation n°4 qui présente la dynamique des niveaux d'eau sur la partie Nord du lac Champlain, en réponse aux événements de vent, est disponible.

On se propose dans la section qui suit de présenter les principaux résultats obtenus pour les différentes simulations.

⁵ Toutes les données et résultats de simulation peuvent être fournis

6. Analyse des résultats

Comme il a été avancé dans la section 4.2, la confrontation des sorties de *H2D2* avec les observations montre que :

- Les simulations sous-estiment systématiquement les niveaux d'eau réels (des écarts de plus de 20cm dans la plupart des stations);
- Les simulations ne reproduisent pas le comportement général constaté, à savoir la montée rapide des niveaux d'eau ainsi que le pic au mois de Mai;
- Les différentes simulations présentent une augmentation plus progressive des niveaux d'eau sur toutes les stations.

À la Figure 10, on présente les sorties de simulation avec la fonction de vent de Kumar (2009) pour le cas des jeunes vagues (simulation n°4).



Figure 10. Niveaux d'eau observés et simulés

On se propose alors par la suite de comparer les résultats des simulations entre elles et de tirer des conclusions sur :

- les formules du vent testées,
- la sensibilité à quelques paramètres du modèle.

On se propose aussi de comparer les observations et simulations en terme d'écarts par rapport au signal lissé, donc de comparer l'effet des événements de vents sur le signal moyen.

6.1. Impact du choix de la fonction de vent

Les simulations n°1 à 4, présentées dans la section 5.2, réagissent bien au cours des événements de vents. De la comparaison des sorties des simulations, on a :

- les variations des niveaux d'eau sont synchrones, il n'y a pas donc de déphasage entre ces différentes simulations (voir l'exemple de la Figure 11),
- la réponse aux vents varie, en termes d'amplitude, d'une simulation à une autre et d'une station à une autre.



Figure 11. Niveaux d'eau dans la station de Rouses Point (événement 1&2) (Kumar (2009) : N; Sheppard (1958) : B; Wu(1980) : V; Kondo (1975) : R)

On présente les niveaux d'eau issus des simulations :

- à la Figure 11 pour l'événement 1&2 au niveau de Rouses Point,
- à la Figure 12 pour l'événement 5 au niveau de Rouses Point et Burlington.



Figure 12. Niveaux d'eau à l'événement 5 dans Rouses Point (en haut) et Burlington (en bas) (Kumar (2009) : N; Sheppard (1958) : B; Wu(1980) : V; Kondo (1975) : R)

On constate que :

les simulations n°2 et 4, avec la fonction de vent de Sheppard (1958) et Kumar (2009) respectivement, donnent des niveaux d'eau assez similaires. Il en est de même pour les simulations n°1 et 3 (avec Wu (1980) et Kondo (1975) respectivement),

- les écarts entre les sorties des simulations sont notables entre autre en comparant les simulations 2 et 4 avec 1 et 3,
- la différence entre les simulations ne dépasse pas les 10 cm.
- la réponse à un même événement de vent diffère selon la localisation de la station. En effet, Rouses Point présente des fluctuations intenses du niveau d'eau (plus de 10 cm), contre des fluctuations de moins de 2 cm pour Burlington.

Des scatter plot entre les différentes simulations permettent une analyse et comparaison encore plus détaillée.



Figure 13. Scatter plot des écarts (m) entre les simulations 1 et 2. La couleur est indexée sur les normes des vitesses de vent

Il ressort de la Figure 13 que :

 Fryers et Whitehall présentent les plus faibles décalages par rapport à la diagonale, elles se trouvent à proximité des limites (amont et aval) du modèle du lac (influencées par les conditions aux limites),

- Grande Isle, Burlington et Port Henry présentent des amplitudes minimes (<2cm),
- sur les 4 stations restantes, on constate que la simulation 2 (avec Sheppard (1958))
 donne lieu à des amplitudes plus élevés que ceux avec la simulation 1 (avec Wu(1980))
 pour des normes de vitesses qui dépassent les 4m/s (points verts, jaunes et rouges qui dérivent de la diagonale),
- toujours sur les 4 stations restantes, on constate que les deux simulations présentent des amplitudes similaires pour des faibles vitesses de vent (points bleus et verts qui suivent la diagonale).



Figure 14. Scatter plot des écarts (m) entre les simulations 2 et 3.

La couleur est indexée sur les normes des vitesses de vent

Les mêmes observations ressortent de la Figure 14. On valide les constatations pour Fryers et Whitehall et Grande Isle, Burlington et Port Henry. Pour les stations Saint Jean, Saint Paul, Rouses Point et Philipsburg, on confirme bien, ce qui a été soulevé dans l'analyse théorique des formulations (à la section n°3), à savoir que la fonction de vent de Kondo (1975) (simulation 3) présente par rapport à la fonction de Sheppard (1958) (simulation 2) :

- des coefficients similaires pour des vitesses de vents entre 3 et 5 m/s (nuage de points en bleu qui suit la diagonale),
- des coefficients plus faibles pour des vitesses de vents supérieurs à 5 m/s (les points en rouges et oranges qui dérivent de la diagonale).



Figure 15. Scatter plot des écarts (m) entre les simulations 1 et 3.

La couleur est indexée sur les normes des vitesses de vent.

On illustre à travers la Figure 15 et la Figure 16 les similitudes déjà constatées entre les simulations n°2 et 4 et entre les simulations n°1 et 3. Les nuages de points suivent assez bien la diagonale avec une légère dérivation avantageant la simulation 3 par rapport à la $1^{ière}$ et la simulation 2 par rapport à la $4^{ième}$ pour les faibles et moyennes vitesses de vent.



Figure 16. Scatter plot des écarts (m) entre les simulations 2 et 4.

La couleur est indexée sur les normes des vitesses de vent

Finalement, les conclusions tirées des scatter plot concordent bien avec celles tirées de la comparaison théorique entre les modèles de vent réalisée dans la section n°3 du rapport. Les modèles implantés dans *H2D2*, et *H2D2*, réagissent donc en accord avec la théorie.

On regroupe, dans le Tableau 7, les amplitudes maximales pour les simulations n°1 à 4, pour l'ensemble des sondes implémentées et pour tous les événements de vent.

Événement	Source des	Stations de suivi ⁶								
Evenement	données	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Simulation 1	14.6	15.9	10.7	9.7	13.3	5.1	1.2	3.1	3
	Simulation 2	14.6	10.6	13.8	22	17.2	6.9	1.6	3.9	3
1&2	Simulation 3	14.6	15.8	11.1	14.5	9.7	4.7	1.3	3.3	2.8
	Simulation 4	14.6	20.2	12.2	22.8	17	7.1	1.4	3.6	3
	Observations	-	-	-	14.4	10.3	10.7	-	13.3	37
	Simulation 1	7.2	6.1	4.2	4.2	8.4	2.6	0.9	2.8	1.1
2	Simulation 2	7.2	7.6	5.3	5.4	10.5	3.3	1.1	3.5	1.1
5	Simulation 3	7.2	6.9	4.9	4.6	9	2.8	1	3	1.1
	Simulation 4	7.2	6.6	4.7	4.8	9.5	3	1.1	3.3	1.1
	Observations	-	-	-	10.9	20.1	6	8.4	11.1	29.3
	Simulation 1	6.5	7.1	4.9	4.5	6.7	2.2	1	2.3	2.1
	Simulation 2	6.5	9	6.2	5.4	8.3	2.9	1.2	2.8	2.3
4	Simulation 3	6.5	8.1	5.5	4.9	7.3	2.3	1.1	2.5	2.4
	Simulation 4	6.5	7.9	5.5	4.8	7.5	2.7	1.2	2.6	2.1
	Observations	-	-	-	12.4	12	2.9	9	8.6	23.1
	Simulation 1	9.6	9.8	5.1	4.8	6.6	1.6	0.9	4.8	7.5
	Simulation 2	9.6	13	6.7	6.1	8.2	1.9	1	6.2	6.5
5	Simulation 3	9.6	10.5	5.8	5.4	7.2	1.8	1.3	4.9	5.9
	Simulation 4	9.6	11.7	5.9	5.5	7.4	1.7	0.9	5.7	8.2
	Observations	-	-	-	25	15.1	7.5	4.6	16.3	46.4
	Simulation 1	13	11.3	14.2	13.5	15.1	3.7	2.1	3.9	7.3
	Simulation 2 ⁷	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	Simulation 3	13	11.9	14.4	13.5	15.4	3.4	2.1	4.1	8.4
	Simulation 4	13	13.7	17.6	17.1	18.3	5.2	2.8	4.8	8.6
	Observations	-	-	-	21.4	23.2	4	8.2	18.1	44.2

Tableau 7. Amplitudes des niveaux d'eau (cm) : Simulations VS. Observations

6.2. Confrontation aux mesures : comparaison des écarts

On se propose de comparer les signaux des niveaux d'eau et les écarts obtenus par chaque simulation en parallèle avec les observations (voir de la Figure 17 à la Figure 20 et le Tableau 7).

 ⁶ Indentification des stations : 1= Fryers, 2= Saint-Jean, 3= Saint-Paul-De-L'Île-Aux-Noix, 4= Rouses Point,
 5= Philipsburg, 6= Grande Isle, 7= Burlington, 8= Port Henry, 9= Whitehall.

⁷ Données manquantes (la simulation a été interrompue par une panne et n'a pas été complétée)



Figure 17. Signal des observations VS Simulation 1



Écarts

Figure 18. Signal des observations VS Simulation 2

Écarts



Figure 19. Signal des observations VS Simulation 3

Écarts



Figure 20. Signal des observations VS Simulation 4

La confrontation des signaux bruts avec les simulations révèle que ces derniers ne reproduisent pas bien les observations, les niveaux d'eau moyens ainsi que les variations au cours du temps sont plus faibles que les observations pour les différentes stations de suivi.

La confrontation en termes des écarts montre que, parfois, le modèle est capable de réagir aux vents et que certaines stations (Philipsburg et Rouses Point) présentent des dynamiques qui se rapprochent des mesures, mais avec moins de variabilité entre les événements. Cependant, le modèle semble parfois ne pas réagir au cours des événements de vent (voir l'exemple de la station Burlington).

Comme attendu, et confirmé par le scatter plot des écarts entre les données observées et la simulation n° 4 (Figure 21), il n'y a pas d'erreur systématique. Celle-ci a été retirée par le traitement de données. Globalement, toutes les pentes sont plus petites que l'unité et sont pratiquement nulles pour les stations Burlington, Grande Isle et Whitehall.



Figure 21. Scatter plot des écarts : Observations VS. Simulation 4

Les simulations peuvent sembler moins dynamiques que les mesures à partir du scatter plot, ce qui pourtant n'est pas corroboré par cet ensemble de figures : Figure 17 à la Figure 20.

Toutes les stations devraient faire l'objet d'une étude plus approfondie pour déterminer s'il y a des faiblesses au niveau du modèle de terrain : maillage trop grossier, sensibilité de la prise de mesure aux vagues et au vent, etc..

6.3. Sensibilité aux paramètres du modèles

Au niveau de cette section, on présente l'impact de la variation de trois paramètres du modèle sur les résultats des simulations : la longueur de mélange, le pas de temps de calcul et le Peclet.

6.3.1. Influence de la longueur de mélange

L'analyse des simulations n°4 et 5 (Figure 22), pour lesquelles la longueur de mélange passe de 2 à 1, ne révèle pas de différence notable.





6.3.2. Choix du pas de temps

L'analyse des résultats issus des deux simulations n°4 et 6, avec un pas de 15min et 1h respectivement, montre que :

- les écarts entre les niveaux d'eau ne sont pas significatifs. Tel qu'il est présenté dans la Figure 23, les nuages de points suivent parfaitement la diagonale;
- la durée de la simulation 6 est environ 4 fois plus courte que celle de la simulation 4 par contre cette dernière fourni plus de points intermédiaires permettant de mieux présenter l'évolution de la surface de l'eau sur le lac au court des différents épisodes de vent fort.



Figure 23. Scatter plot des simulations 4 VS. 6

6.3.3. Influence du Peclet

L'analyse des simulations n°5 et 7, avec principalement la variation du Peclet de 1 et 1.5 respectivement, montre que :

- l'effet de l'augmentation du Peclet se ressent légèrement à Whitehall (limite amont du modèle) : les niveaux d'eau baissent de moins de 5cm en augmentant le Peclet de 0.5,
- une augmentation des niveaux est notée, pour la simulation 7 par rapport à la n°5, sur certaines stations (St-Jean, St-Paul, Rouses Points et Philipsburg) lorsque la vitesse du vent dépasse 6m/s,
- comme les vitesses du vent dans le lac sont généralement faibles (au cours de la période d'étude), la différence entre les niveaux d'eau n'est pas significative entre les résultats des deux simulations.





6.3.4. Synthèse de l'analyse de sensibilité

La variation des paramètres du modèle n'a pas d'effet significatif sur la variation des niveaux d'eau. En effet, les différents essais réalisés montrent bien qu'une perturbation de la longueur du mélange, du Peclet ou du pas de calcul n'a pas d'influence notable sur les résultats des simulations : les niveaux d'eau sur le lac Champlain restent pratiquement invariants. C'est vraiment le choix de la fonction du vent qui génère des résultats de simulation des niveaux d'eau qui sont différents.

Conclusions et perspectives

L'étude présente une revue de littérature de modèles de vent existant. Elle ne prétend pas être exhaustive, mais montre que les différents modèles comportent une base empirique et sont obtenus par régression sur des données mesurées. Neuf modèles représentant un large éventail de comportement ont été choisis et intégrés à *H2D2*.

L'application sur le lac Champlain confirme que l'étalonnage du modèle n'est pas terminé et qu'il reste des erreurs systématiques importantes à corriger.

Les simulations montrent bien que les modèles de vent implantés dans *H2D2* réagissent en accord avec la théorie. En effet, la comparaison des amplitudes, issues des simulations entre elles, montre bien l'influence de la fonction de vent choisie et la sensibilité de celle-ci aux différentes intensités du vent.

Par élimination du signal moyen, on a tenté d'isoler l'effet du vent sur les niveaux d'eau et ainsi de quand même permettre une comparaison observations/simulations. La comparaison des écarts obtenus montre une assez bonne concordance entre les dynamiques, mais seulement sur certaines stations.

À l'issu de cette étude, et notamment à partir des résultats des différentes analyses, on identifie plusieurs causes possibles, qui ne sont pas contradictoires et possiblement complémentaires :

- Pour les modèles de vent :
 - Les mesures de niveau sont très dynamiques. Est-ce du bruit ou bien les modèles sélectionnés ne sont pas suffisamment actifs sur les vents faibles?
- Pour la série de vent :
 - le vent tel qu'extrait du GEMM n'est-il pas trop lisse, dans le temps et dans l'espace, conduisant à des résultats moins dynamiques?
- Pour le modèle hydrodynamique :
 - Serait-il trop dissipatif? Cette hypothèse est partiellement levée à la section 6.3.1.
- Pour les simulations :

- Les mesures de niveau sont aux 15 minutes, les vents aux 60 minutes et les simulations aux 30 minutes. Il faudrait probablement lisser les mesures pour qu'elles soient plus cohérentes avec les simulations?
- Pour les points de mesure :
 - effectuer une analyse individuelle pour chaque point de suivi afin d'identifier les conditions locales qui peuvent influencer les mesures.

Bien évidemment l'étalonnage du modèle du lac doit être mené à bien pour réduire les erreurs systématiques.

Finalement, cette étude nous permet de recommander l'utilisation des formulations de Sheppard(1958) ou de Kumar(2009), tout en soulignant que les résultats sont validés pour une série de vents observés sur le Lac Champlain avec des normes de vitesse de moins de 15m/s.

Références bibliographiques

- Charnock H (1955) Wind stress on a water surface. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 81(350):639-640.
- Fortin V, Gaborit E & Dimitrijevic M (2015) Évaluation de l'efficacité des prévisions météorologiques aux fins de la prévision des crues du lac Champlain et la rivière Richelieu. (Environnement Canada : Division de recherche en météorologie), p 45.
- Garratt JR & Taylor PA (1996) Boundary-Layer Meteorology 25th Anniversary Volume, 1970– 1995: Invited Reviews and Selected Contributions to Recognise Ted Munn's Contribution as Editor over the Past 25 Years. kluwer Academic Publishers,
- Guan C & Xie L (2004) On the linear parameterization of drag coefficient over sea surface. Journal of Physical Oceanography 34(12):2847-2851.
- Kumar RR, Kumar BP, Satyanarayana A, Subrahamanyam DB, Rao A & Dube S (2009)
 Parameterization of sea surface drag under varying sea state and its dependence on wave age. *Natural hazards* 49(2):187-197.
- Makin V, Kudryavtsev V & Mastenbroek C (1995) Drag of the sea surface. *Boundary-Layer Meteorology* 73(1-2):159-182.
- Taylor PK & Yelland MJ (2001) The dependence of sea surface roughness on the height and steepness of the waves. *Journal of physical oceanography* 31(2):572-590.
- Wu J (1969) Wind stress and surface roughness at air-sea interface. *Journal of Geophysical Research* 74(2):444-455.
- Wu J (1980) Wind-stress coefficients over sea surface near neutral conditions-A revisit. *Journal of Physical Oceanography* 10(5):727-740.