

Le point sur les marées d'équinoxes dans l'estuaire du Saint-Laurent

Daniel Bourgault, Cédric Chavanne, Dany Dumont, Émilie Morin, Peter S. Galbraith et Louis Gostiaux

Volume 140, numéro 1, hiver 2016

URI : <https://id.erudit.org/iderudit/1034101ar>

DOI : <https://doi.org/10.7202/1034101ar>

[Aller au sommaire du numéro](#)

Éditeur(s)

La Société Provancher d'histoire naturelle du Canada

ISSN

0028-0798 (imprimé)

1929-3208 (numérique)

[Découvrir la revue](#)

Citer cet article

Bourgault, D., Chavanne, C., Dumont, D., Morin, É., Galbraith, P. S. & Gostiaux, L. (2016). Le point sur les marées d'équinoxes dans l'estuaire du Saint-Laurent. *Le Naturaliste canadien*, 140(1), 73–84. <https://doi.org/10.7202/1034101ar>

Résumé de l'article

Selon une étude publiée dans *Le Naturaliste canadien*, les marées de l'estuaire du Saint-Laurent ne seraient pas plus grandes aux équinoxes qu'à d'autres moments de l'année. Cette idée de marées plus grandes aux équinoxes relèverait plutôt d'une croyance populaire sans fondements théoriques, répandue même parmi la communauté scientifique. Il est démontré ici que ces conclusions contredisent en fait la théorie des marées et découlent d'un problème de sous-échantillonnage des données de marées. Une analyse basée sur 30 ans d'observations horaires du niveau de la mer à la station Rimouski montre que, statistiquement, les marées sont bel et bien plus énergétiques autour des équinoxes, en accord avec la théorie des marées. Cependant, cette conclusion statistique n'indique pas nécessairement que les marées les plus fortes d'une année particulière se rencontrent précisément aux jours des équinoxes puisque l'augmentation du marnage vers les équinoxes est faible comparativement aux variations de marnages associées au cycle vive-eau/morte-eau (2 semaines) qui n'est pas synchronisé avec les équinoxes. La théorie des marées est expliquée simplement et un schéma est proposé pour illustrer l'influence du cycle équinoxe-solstice sur les marées.

Le point sur les marées d'équinoxes dans l'estuaire du Saint-Laurent

Daniel Bourgault, Cédric Chavanne, Dany Dumont, Émilie Morin, Peter S. Galbraith et Louis Gostiaux

Résumé

Selon une étude publiée dans *Le Naturaliste canadien*, les marées de l'estuaire du Saint-Laurent ne seraient pas plus grandes aux équinoxes qu'à d'autres moments de l'année. Cette idée de marées plus grandes aux équinoxes relèverait plutôt d'une croyance populaire sans fondements théoriques, répandue même parmi la communauté scientifique. Il est démontré ici que ces conclusions contredisent en fait la théorie des marées et découlent d'un problème de sous-échantillonnage des données de marées. Une analyse basée sur 30 ans d'observations horaires du niveau de la mer à la station Rimouski montre que, statistiquement, les marées sont bel et bien plus énergétiques autour des équinoxes, en accord avec la théorie des marées. Cependant, cette conclusion statistique n'indique pas nécessairement que les marées les plus fortes d'une année particulière se rencontrent précisément aux jours des équinoxes puisque l'augmentation du marnage vers les équinoxes est faible comparativement aux variations de marnages associées au cycle vive-eau/morte-eau (2 semaines) qui n'est pas synchronisé avec les équinoxes. La théorie des marées est expliquée simplement et un schéma est proposé pour illustrer l'influence du cycle équinoxe-solstice sur les marées.

MOTS CLÉS : équinoxe, estuaire du Saint-Laurent, marée, observations, prédictions

Abstract

According to a study published in *Le Naturaliste canadien*, tides in the St. Lawrence Estuary would not be any greater at the equinoxes than they are at any other moment of the year. According to the study, the idea that tides may be larger at the equinoxes is a popular unfounded belief that is widespread, even among scientists. Here, it is demonstrated that these conclusions contradict the theory of tides and arise from a problem in the subsampling of tide data. A statistical analysis based on 30 years of hourly water level observations at Rimouski, shows that tides are indeed more energetic around the equinoxes, which is in agreement with the theory of tides. However, this conclusion does not necessarily indicate that the greatest tides always appear precisely at the equinoxes in a given year. This is because the increase in the tidal range as the equinoxes are approached is rather small in comparison with the large neap-spring tidal variability, which is not synchronized with the equinoxes. The theory of tides is explained in simple terms and a schematic diagram is proposed to explain the effect on tides during the equinox-solstice cycle.

KEYWORDS: equinox, observations, predictions, St. Lawrence Estuary, tide

Introduction

Dans 2 articles semblables, Dionne (2005, 2008) tente de faire la lumière sur ce qu'il considère être une croyance populaire répandue au Québec à propos du comportement des marées de l'estuaire du Saint-Laurent. Selon les conclusions tirées, le grand public croirait faussement que les marées les plus grandes se situent lors des équinoxes. Il est de plus affirmé dans ces études que cette croyance circule même dans la communauté scientifique. En appui, Dionne (2008) cite, parmi d'autres exemples, l'extrait suivant tiré du guide de Chabot et Rossignol (2003 : 3) sur l'identification des algues et de la faune du littoral du Saint-Laurent : « ...au moment des équinoxes... les grandes marées sont les plus fortes de l'année ». Selon l'analyse et l'interprétation effectuées par Dionne, cette notion ne serait qu'une croyance populaire erronée et l'expression de marées d'équinoxe est « insidieuse en laissant croire qu'il s'agit des plus grandes marées de l'année quant à la hauteur et à l'amplitude. » (Dionne, 2005). Dionne (2008) conclut que, « dans l'estuaire du Saint-Laurent, les plus hauts

et les plus bas niveaux de la marée ne sont pas atteints lors des équinoxes. » Quelques années plus tard, Dionne (2010) généralise ses conclusions à tout l'est du Canada ainsi qu'à l'Arctique canadien.

Dionne (2008) laisse entendre que, selon la théorie même des marées, le cycle équinoxe-solstice n'a pas d'incidence notable sur les marées en général, et sur les marées du Saint-Laurent en particulier. C'est ainsi qu'il conclut que « La croyance

Daniel Bourgault, Cédric Chavanne et Dany Dumont sont professeurs à l'Institut des sciences de la mer de Rimouski, Peter Galbraith est chercheur pour Pêches et Océans Canada à l'Institut Maurice-Lamontagne et Louis Gostiaux est chercheur au Conseil national de la recherche scientifique à l'École Centrale de Lyon (France). Ils sont tous spécialistes de l'océanographie physique des milieux côtiers avec des intérêts de recherche qui touchent, entre autres, à l'estuaire et au golfe du Saint-Laurent. Émilie Morin est professionnelle de recherche et chargée de cours à l'Université Laval et est spécialiste en didactique des sciences.

daniel_bourgault@uqar.ca

générale ou populaire n'a donc pas de fondements valables, du moins si on s'en remet à la théorie ou à la cause de la marée à savoir l'attraction exercée sur la Terre par la Lune et le Soleil.»

Ces conclusions sont surprenantes car, en réalité, elles contredisent la théorie générale de la marée. Cette théorie est bien établie et montre que le cycle semi-annuel équinoxe/solstice module bien le comportement des marées étant donné la variation que ce cycle engendre sur la déclinaison du Soleil ($\pm 23,45^\circ$), c'est-à-dire sur l'angle formé entre le plan équatorial et l'axe Terre-Soleil (p. ex. : Lamb, 1932; Defant, 1961; Forrester, 1983).

Théorie

Afin de faciliter la compréhension de ce qui suivra, il est utile de savoir que la marée dans l'estuaire du Saint-Laurent est de type semi-diurne à inégalité diurne, c'est-à-dire que le cycle semi-diurne domine, mais présente toutefois des différences non négligeables entre les hauteurs des pleines ou des basses mers consécutives. Ces inégalités sont causées par la présence d'un cycle diurne (Organisation Hydrographique Internationale, 1998). De plus, la marée dans l'estuaire du Saint-Laurent est fortement influencée par le cycle vive-eau/morte-eau d'une période d'environ 2 semaines. Les périodes de vives-eaux se produisent aux époques de pleine et de nouvelle Lune et sont caractérisées par des marées de forts marnages,

c'est-à-dire de grandes différences de niveaux entre les pleines et les basses mers consécutives (Organisation Hydrographique Internationale, 1998).

L'essentiel de la théorie des marées est présenté à la figure 1. Cette figure montre comment l'amplitude des composantes semi-diurnes (~ 2 fois/jour), diurnes (~ 1 fois/jour) et semi-annuelles (cycle équinoxe-solstice) du niveau de la mer varie selon la déclinaison du Soleil (limitée entre 0° et $23,45^\circ$) et selon la latitude (entre 0° et 90°). Les détails mathématiques de cette théorie sont présentés à l'annexe 1.

La théorie indique donc qu'aux équinoxes, lorsque la déclinaison du Soleil est de 0° , l'amplitude des marées semi-diurnes atteint son maximum annuel (d'où le terme « marées d'équinoxes »); celle des marées diurnes est nulle, et celle des marées semi-annuelles est négative mais atteint son maximum annuel en valeur absolue étant donné que la déclinaison du Soleil est limitée entre 0° et $23,45^\circ$ (N ou S). Aux solstices, en revanche, la déclinaison du Soleil étant de $23,45^\circ$ (N ou S), l'amplitude des marées semi-diurnes est réduite de 16% (0,84 sur la figure 1), celle des marées diurnes atteint son maximum annuel, et celle des marées semi-annuelles atteint son minimum annuel en valeur absolue. Ces variations annuelles sont illustrées sur la figure 2 pour la latitude de Rimouski ($48,48^\circ$ N). Notons que le signe de l'influence du cycle semi-annuel sur le niveau moyen de la mer dépend de

la latitude. Alors qu'aux hautes latitudes ($> 35,27^\circ$ N ou S), le niveau d'eau moyen est plus bas aux équinoxes qu'aux solstices (figure 2), aux basses latitudes ($< 35,27^\circ$ N ou S), le niveau d'eau moyen est plus élevé aux équinoxes qu'aux solstices.

Problématique

À la lumière de la théorie présentée ci-dessus, il apparaît fondamentalement correct d'affirmer que, d'une façon générale, dans les régions dominées par les marées semi-diurnes, telles que l'estuaire du Saint-Laurent, les marées sont plus fortes aux équinoxes. La question qui se pose alors est de comprendre comment Dionne (2005, 2008, 2010) en est arrivé à contredire ainsi la théorie. Après tout, il se pourrait bien que la marée dans le Saint-Laurent ne se comporte pas comme la théorie le prédit, en raison de propriétés bathymétriques ou hydrographiques qui lui seraient propres et qui pourraient induire des comportements particuliers.

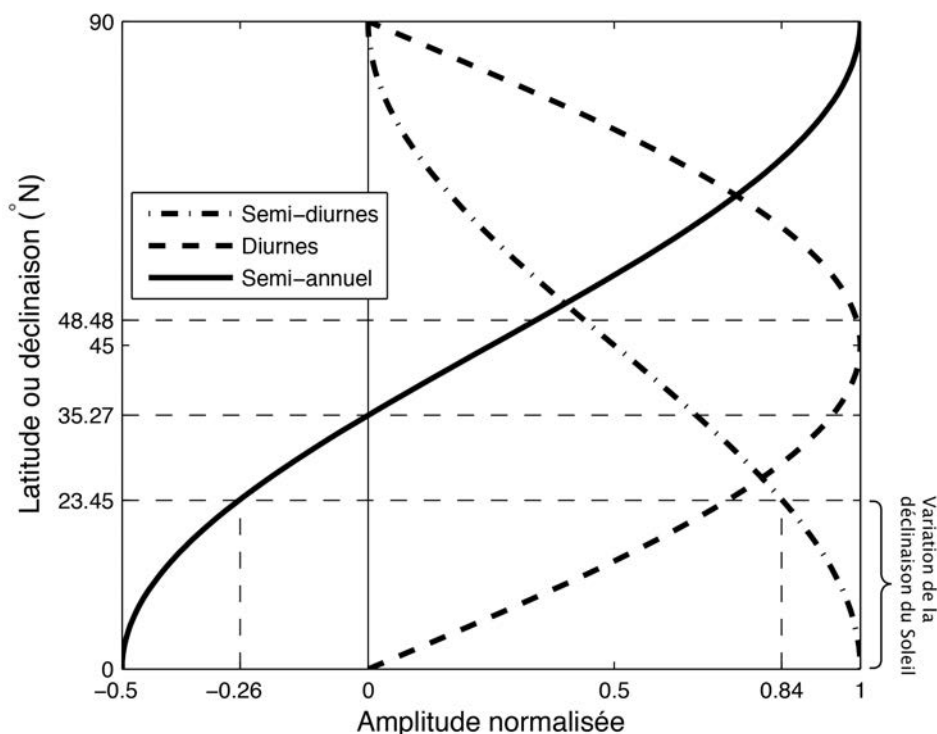


Figure 1. Amplitudes normalisées des marées en fonction de la latitude du point d'observation ou de la déclinaison de l'astre responsable de la marée, pour les composantes semi-diurnes, diurnes et semi-annuelle. Les droites fines en tirets indiquent des valeurs particulières mentionnées dans le texte telles que la latitude de Rimouski ($48,48^\circ$ N), la latitude à laquelle l'amplitude semi-annuelle est nulle ($35,27^\circ$ N) ainsi que la déclinaison du Soleil aux solstices ($23,45^\circ$ N). Ce graphique a été réalisé à partir de l'équation générale des marées statiques (Lamb, 1932; Defant, 1961).

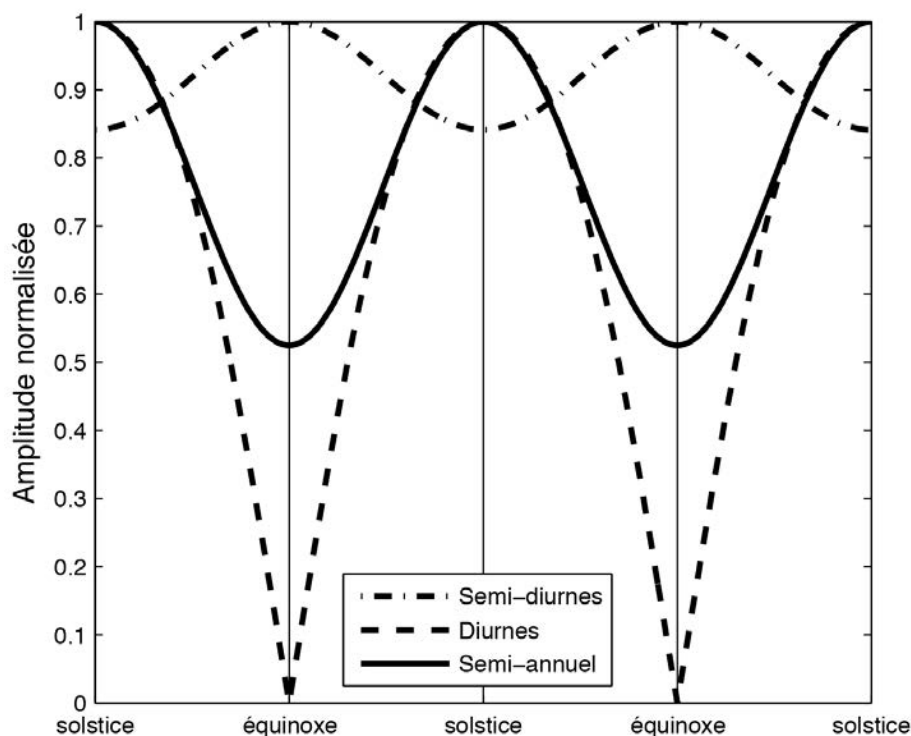


Figure 2. Série temporelle théorique des amplitudes semi-diurne, diurne et semi-annuelle normalisées pour la latitude de Rimouski (48,48°N). Ce graphique a été réalisé à partir de l'équation générale des marées statiques (Lamb, 1932; Defant, 1961).

C'est donc dans ce contexte qu'il nous est apparu pertinent de faire le point sur le comportement des marées au voisinage des équinoxes en revisitant les travaux de Dionne (2008) avec de nouvelles analyses basées sur 30 années de mesures du niveau d'eau dans l'estuaire du Saint-Laurent.

Terminologie

Qu'est-ce que la marée ?

Selon le Manuel canadien des marées, la marée est définie comme étant : « [...] la réponse de l'océan aux variations périodiques des forces d'attraction exercées par la Lune et par le Soleil ». (Forrester, 1983 : 1)

Selon cette définition, la marée ne serait que d'origine astronomique. Il s'agit là de la définition adoptée par Dionne (2008). Cependant, au Québec, les gens et les médias associent aussi la marée à des événements de variations du niveau de la mer causées par des tempêtes de vent ou autres phénomènes météorologiques (p. ex. : SRC, 2011). Selon le dictionnaire hydrographique de l'Organisation Hydrographique Internationale (1998:131), la définition de la marée inclut effectivement des fluctuations d'autres origines que celles astronomiques : « Mouvement multipériodique du niveau de la mer dont la partie principale est la marée astronomique ».

Cette définition laisse donc entendre qu'au moins un autre phénomène cause la marée. En effet, la marée est composée principalement de la marée astronomique, mais

aussi de la marée météorologique qui, elle, est ainsi définie : « Partie de la marée due aux conditions météorologiques locales et générales, par opposition à la marée astronomique ». (Organisation Hydrographique Internationale, 1998:131)

Par ces définitions, donc, la marée est le résultat de l'effet combiné de l'attraction gravitationnelle exercée par la Lune et le Soleil et des conditions météorologiques. Les termes « marée de tempête » et « onde de tempête » sont synonymes (Organisation Hydrographique Internationale, 1998 :152) et font allusion à l'impact anormalement fort des marées météorologiques, causées par l'effet du baromètre inverse et par empilement d'eau par le vent, lors de tempêtes. Nous adopterons ces définitions de l'Organisation Hydrographique Internationale (1998), qui fait aujourd'hui foi d'autorité en ce qui a trait à la terminologie hydrographique.

Dionne (2008) a basé son analyse uniquement sur le signal prédictible de la marée, en scrutant les tables de marées. Ici, nous analyserons non seulement les prédictions, mais aussi les observations de niveau de la mer qui, elles, intègrent à la fois la marée astronomique dominante ainsi que la marée météorologique épisodique.

Qu'est-ce qu'une grande marée ?

Il n'existe pas de définition formelle pour qualifier ce qu'est une grande marée (Organisation Hydrographique Internationale, 1998). Cette expression peut évoquer au moins 3 concepts différents : 1) Pour les riverains de l'estuaire du Saint-Laurent, l'expression peut faire allusion à des niveaux d'eau anormalement élevés qui pourraient risquer de créer des inondations; 2) Pour d'autres, l'expression peut, au contraire, résonner avec des niveaux d'eau anormalement bas. On peut penser par exemple à ces randonneurs qui, lorsque cela est possible quelques fois par année, traversent à pied jusqu'à l'île Saint-Barnabé, tout juste au large de Rimouski (p. ex. : SRC, 2013). On peut aussi penser aux pêcheurs d'anguilles sur les battures du Bas-Saint-Laurent pour qui grandes marées riment avec de très bas niveaux d'eau; 3) Enfin, pour les océanographes ou pour les géomorphologues qui s'intéressent, par exemple, aux mouvements de sédiments du littoral par les courants de marée, le concept de grandes marées peut faire allusion à des périodes où le marnage est anormalement grand. Le marnage est une notion importante pour les scientifiques

qui s'intéressent à la dynamique des milieux côtiers, car l'énergie de la marée est proportionnelle au carré du marnage. Autrement dit, si le marnage double, l'énergie mécanique de la marée quadruple.

Notre analyse portera sur ces 3 aspects. La question est donc de savoir si l'un ou l'autre de ces phénomènes se manifeste ou non autour des équinoxes dans l'estuaire du Saint-Laurent et si oui, quelle est son importance. La théorie prédit qu'autour des équinoxes, le niveau moyen de l'eau devrait être plus bas et le marnage plus grand aux latitudes du Saint-Laurent. Cela devrait se refléter par une plus grande probabilité de trouver des niveaux anormalement bas. En ce qui a trait aux niveaux anormalement hauts, la probabilité sera plus grande autour des équinoxes seulement si l'augmentation du marnage l'emporte sur la diminution du niveau moyen de la mer. Autrement, la probabilité sera plus faible. Rappelons ici que Dionne (2005, 2008) conclut qu'aucun de ces 3 aspects ne se manifeste de façon plus importante aux équinoxes dans l'estuaire du Saint-Laurent.

Critique de la méthodologie de Dionne (2008)

L'analyse de Dionne (2008) mérite d'être revisitée car elle n'est basée que sur l'extraction du niveau d'eau le plus élevé prédit au jour même des équinoxes, sans prétraitement de la série temporelle. Avec la présence de l'importante modulation semi-mensuelle du cycle de vive-eau/morte-eau, qui n'est pas synchronisée avec le cycle semi-annuel des équinoxes, il n'est pas statistiquement robuste d'extraire un signal d'une période beaucoup plus longue, 6 mois dans ce cas-ci, sans avoir préalablement filtré la série temporelle sur une période au moins aussi longue que le cycle de vive-eau/morte-eau (> 2 semaines). Autrement, cela cause un important problème de sous-échantillonnage qui compromet l'analyse et biaise l'interprétation.

De plus, Dionne (2008: tableau 1) indique qu'il a extrait les hauteurs et les marnages des « marées de vive-eau lors des équinoxes ». Or, sur les 12 équinoxes analysés, seulement 3 vives-eaux coïncident avec le jour de l'équinoxe. Les 9 autres équinoxes tombent soit entre une vive-eau et une morte-eau, ou soit, dans le pire des cas, pendant les mortes-eaux.

Pour illustrer plus clairement cette critique, nous avons reproduit 30 jours de prédictions harmoniques horaires de marées centrés sur les équinoxes pour les années de 2002 à 2007 (figure 3), c'est-à-dire les années considérées par Dionne (2008). Les régions grisées représentent les fenêtres d'une journée qu'il a examinées pour caractériser les marées lors des périodes d'équinoxes. Cette figure illustre bien le biais que cause ce type de sous-échantillonnage. Le cycle équinoxe-solstice, s'il existe, se trouve dissimulé derrière l'importante modulation vive-eau/morte-eau. Dans ces situations, il est nécessaire d'appliquer un filtre passe-bas afin de faire ressortir le cycle de longue période d'intérêt et ainsi permettre de conclure sur son importance.

Notons aussi qu'en appui à sa démonstration, Dionne (2008) cite un mémoire de maîtrise de Deblois (1988) intitulé *Les marées d'équinoxe correspondent-elles aux plus grandes*

Tableau 1. Constantes harmoniques de quelques composantes principales semi-diurnes (M_2 et S_2), diurnes (K_1 et O_1) et de longues périodes (S_{sa} et S_a) qui caractérisent la marée à Rimouski. Ces constantes ont été calculées par une analyse harmonique effectuée sur près de 30 ans de mesures horaires à la station Rimouski (figure 3).

Composante	Période (jour)	Amplitude (cm)	Phase (°)
Principale lunaire semi-diurne (M_2)	0,518	127,00	201
Principale solaire semi-diurne (S_2)	0,500	40,50	242
Déclinaison luni-solaire diurne (K_1)	0,997	23,60	278
Principale lunaire diurne (O_1)	1,076	21,80	253
Solaire semi-annuelle (S_{sa})	182,621	2,43	145
Solaire annuelle (S_a)	365,260	2,23	175

marées de l'année? Or, après vérification, il ne s'agit pas là d'un mémoire de maîtrise mais plutôt d'un mémoire de baccalauréat du Département de géographie de l'Université Laval. Ce mémoire n'est pas publié et nous n'avons pas été en mesure d'obtenir de copie d'aucune bibliothèque ni du Département de géographie de l'Université Laval. Le Dr Dionne a eu l'amabilité de nous transmettre sa copie. La méthodologie utilisée dans ce mémoire est comparable à celle utilisée par Dionne (2008). Étant donné que ce mémoire n'est pas publié et, en pratique, inaccessible, nous n'y ferons plus référence ici.

Données

Notre analyse porte sur la station Rimouski dans l'estuaire maritime du Saint-Laurent (station 2985, anciennement nommée Pointe-au-Père). Cette station a la particularité d'être peu sensible aux variations saisonnières et épisodiques associées aux crues (p. ex. : grandes crues printanières) comme l'est par exemple la station de Lauzon, en face de Québec, dans la partie fluviale du Saint-Laurent. Notre analyse est basée à la fois sur des observations (somme des marées astronomique et météorologique) ainsi que sur une analyse harmonique qui ne contient que la portion prédictible de la marée. Celle-ci est principalement d'origine astronomique, mais peut aussi être en partie d'origine climatique.

Le jeu d'observations consiste en un peu plus de 30 ans (8 juillet 1984 au 31 août 2014) de mesures horaires du niveau de la mer (h_0) téléchargées en ligne à partir des Archives canadiennes des données sur les marées et les niveaux d'eau de Pêches et Océans Canada (2015) (figure 4). Cette série temporelle est parsemée de 6,7 % de données manquantes. Aucun effort n'a été fait pour tenter de les combler. L'impact de ces données manquantes se reflète implicitement dans les intervalles de confiance à 95 % sur nos statistiques déterminées par la méthode de bootstrap avec 500 remises (Efron et Gong, 1983).

Afin d'extraire la portion prédictible principalement d'origine astronomique (h_p) du signal de marée observé (h_0), une analyse harmonique a été effectuée sur ces 30 ans

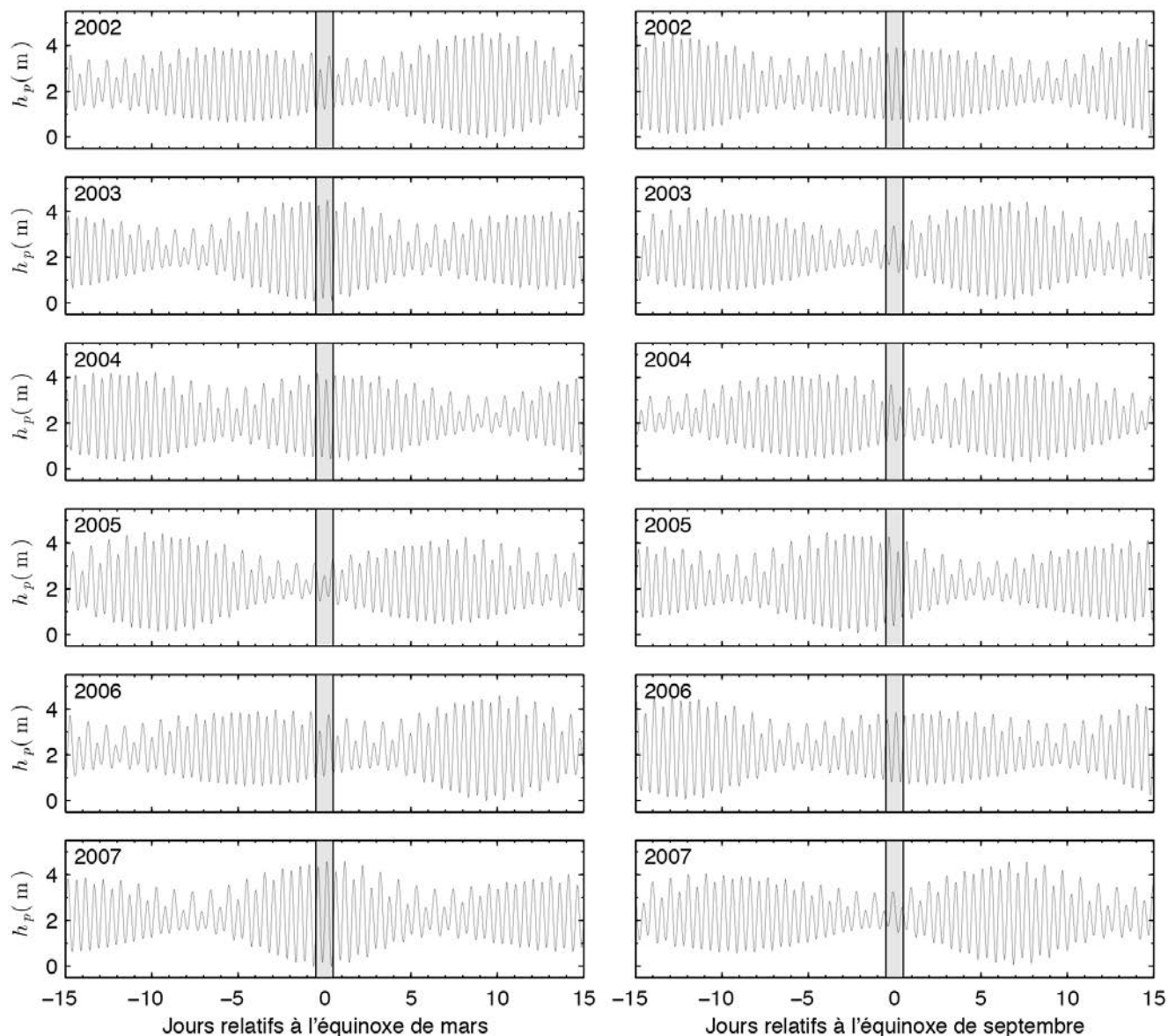


Figure 3. Prédictions harmoniques horaires des marées autour des équinoxes entre 2002 et 2007 à Rimouski (anciennement Pointe-au-Père) présentées ici pour illustrer la base sur laquelle repose l'analyse effectuée par Dionne (2008). Les zones grisées autour des équinoxes représentent les données qu'il a analysées. Neuf fois sur 12, les données ne correspondaient pas au maximum d'une vive-eau coïncidente avec l'équinoxe, les exceptions étant mars 2003, 2007 et septembre 2002.

d'observations à l'aide des boîtes à outils T_Tide et UTide développées, respectivement, par Pawlowicz et collab. (2002) et Codiga (2011) pour le logiciel Matlab. Une fois les 68 composantes harmoniques déterminées, la marée prédictible a été reconstituée sur la période allant du 1^{er} janvier 1984 au 31 décembre 2014 (figure 4).

Remarquons que l'analyse harmonique peut contenir un cycle annuel d'origine climatique (p. ex.: changement de la direction des vents dominants, de la température de l'eau, de la circulation, des débits des rivières, etc.) avec un cycle annuel d'origine purement astronomique. Notre signal harmonique ainsi reconstitué peut donc aussi inclure implicitement une variation annuelle climatique à l'intérieur de la composante

harmonique solaire annuelle (la composante dite S_a). Cependant, cela n'est pas gênant pour la présente discussion, car nous nous intéressons principalement aux variations semi-annuelles causées par le cycle équinoxe-solstice. Or, les vents, la température de l'air et de l'eau ne montrent aucune périodicité semi-annuelle significative sur le Saint-Laurent (Galbraith et collab., 2012). Le débit des rivières est caractérisé par un certain cycle semi-annuel avec une grande crue printanière et un autre léger pic beaucoup plus faible en novembre causé par l'augmentation des précipitations (Galbraith et collab., 2015). Ce faible signal semi-annuel a peu d'influence sur le niveau d'eau à Rimouski et sera négligé dans notre interprétation.

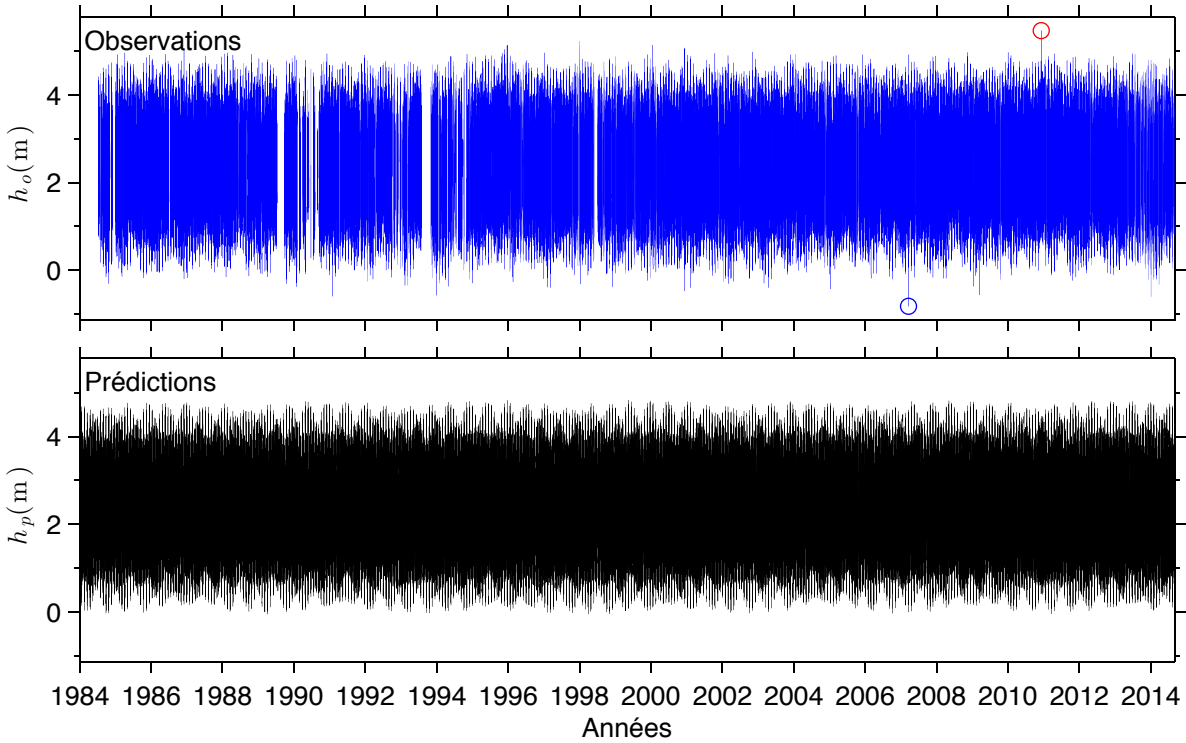


Figure 4. Jeux de données. (haut) Observations horaires du niveau de la mer à la station de Rimouski (station 2985) du 8 juillet 1984 au 31 août 2014. Les cercles bleu et rouge correspondent aux 2 extrêmes mesurés, respectivement, le 21 mars 2007 et le 6 décembre 2010. (bas) Reconstitution harmonique horaire du 1^{er} janvier 1984 au 31 décembre 2014.

Résultats

En soi, les 2 séries temporelles de 30 ans de la marée observée et prédite ne montrent rien d'apparent pour aider à répondre à la question qui nous motive (figure 4). Si un signal équinoxe-solstice existe, il est dissimulé derrière les variations semi-diurnes et semi-mensuelles qui sont beaucoup plus importantes. On y remarque tout de même l'évènement de

niveau d'eau extrêmement élevé du 6 décembre 2010 (cercle rouge) causé par la tempête qui a balayé le Bas-Saint-Laurent et la Gaspésie (SRC, 2010). On remarque aussi un évènement d'une marée extrêmement basse (cercle bleu) le 21 mars 2007. Ces 2 évènements extrêmes coïncident chacun avec une vive-eau. Quelques autres évènements extrêmes moins importants parsèment ces observations. Ces extrêmes, absents de la série de prédiction harmonique, correspondent bien à l'effet de

la marée météorologique combiné à celui de la marée astronomique lors de vives-eaux. On le voit plus clairement lorsque l'on compare les observations et les prédictions autour du 6 décembre 2010 ainsi que la différence entre les 2 signaux (figure 5). Cette différence (en rouge sur la figure) correspond à la marée météorologique. De plus, dans ce cas-ci, une marée de tempête coïncidente avec une vive-eau a créé une surélévation extrême, aussi appelée surcote, le jour du 6 décembre.

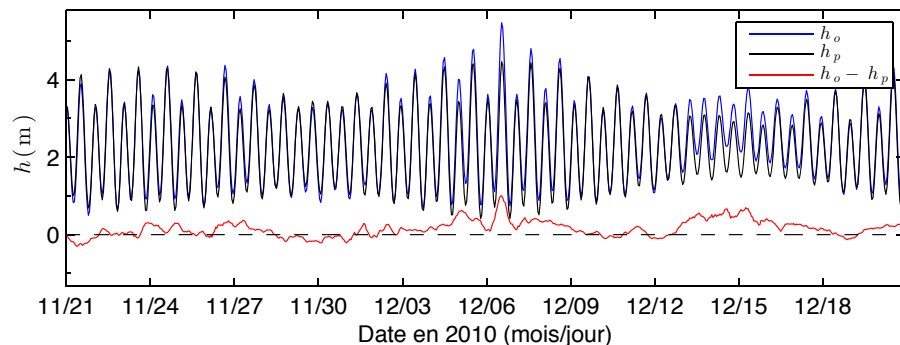


Figure 5. Exemple de 30 jours de comparaison entre les observations horaires (h_o , bleu) et les prédictions harmoniques (h_p , noir) ainsi que la différence ($h_o - h_p$, rouge), centrés autour de la tempête du 6 décembre 2010. La différence peut être considérée comme la marée météorologique et l'évènement extrême du 6 décembre comme une marée de tempête (ou onde de tempête). Notez aussi que l'élévation causée par la marée météorologique autour du 15 décembre a été presque aussi forte que celle du 6 décembre mais est passée inaperçue étant donné sa coïncidence avec de faibles marées astronomiques de mortes-eaux.

Afin de faire ressortir un cycle saisonnier qui pourrait être associé à l'alternance équinoxe-solstice, nous avons réduit le nombre de données en extrayant de chacune des séries les marées hautes (h^\uparrow) et basses (h^\downarrow)

que nous avons ensuite rapportées sur 366 jours, sans égard à l'année de l'observation (figure 6). Cette première analyse permet déjà de cerner un certain patron semi-annuel. Les plus hautes marées hautes semblent se regrouper autour des solstices, alors que les plus basses marées basses semblent se regrouper plutôt autour des équinoxes. Les moyennes et écarts-types sur l'ensemble de ces données sont, pour les observations, de $\langle h_o^{\uparrow} \rangle = 3,58 \pm 0,52$ m et $\langle h_o^{\downarrow} \rangle = 0,95 \pm 0,41$ m et, pour les prédictions, de $\langle h_p^{\uparrow} \rangle = 3,57 \pm 0,49$ m et $\langle h_p^{\downarrow} \rangle = 0,95 \pm 0,38$ m. Les moyennes des observations et des prédictions sont donc très proches et les écarts-types sont légèrement plus grands pour les observations étant donné l'impact supplémentaire qu'apportent les marées météorologiques, absentes de la série harmonique reconstituée.

Un critère quantitatif est maintenant nécessaire pour caractériser ce qu'est une grande marée haute et une grande marée basse. Nous définissons ici une grande marée haute (ou basse) comme étant un niveau de la mer anormal excédant la moyenne des marées hautes (ou basses) de 1.96σ où σ est l'écart-type. Pour une distribution normale, cela correspond à ne considérer qu'une extrémité de 2,5 % de la distribution. Par exemple, selon ce critère, une grande marée haute correspond à un niveau égal ou excédant 4,6 m (zones ombragées, figure 6).

Puisque nous ne nous intéressons qu'aux changements saisonniers associés au cycle équinoxe-solstice, et pour éviter les problèmes de sous-échantillonnage discutés précédemment, des statistiques mensuelles centrées sur le jour 21 de chaque mois ont été effectuées. Le jour 21 étant le jour calendaire moyen des solstices et des équinoxes, les mois de juin et

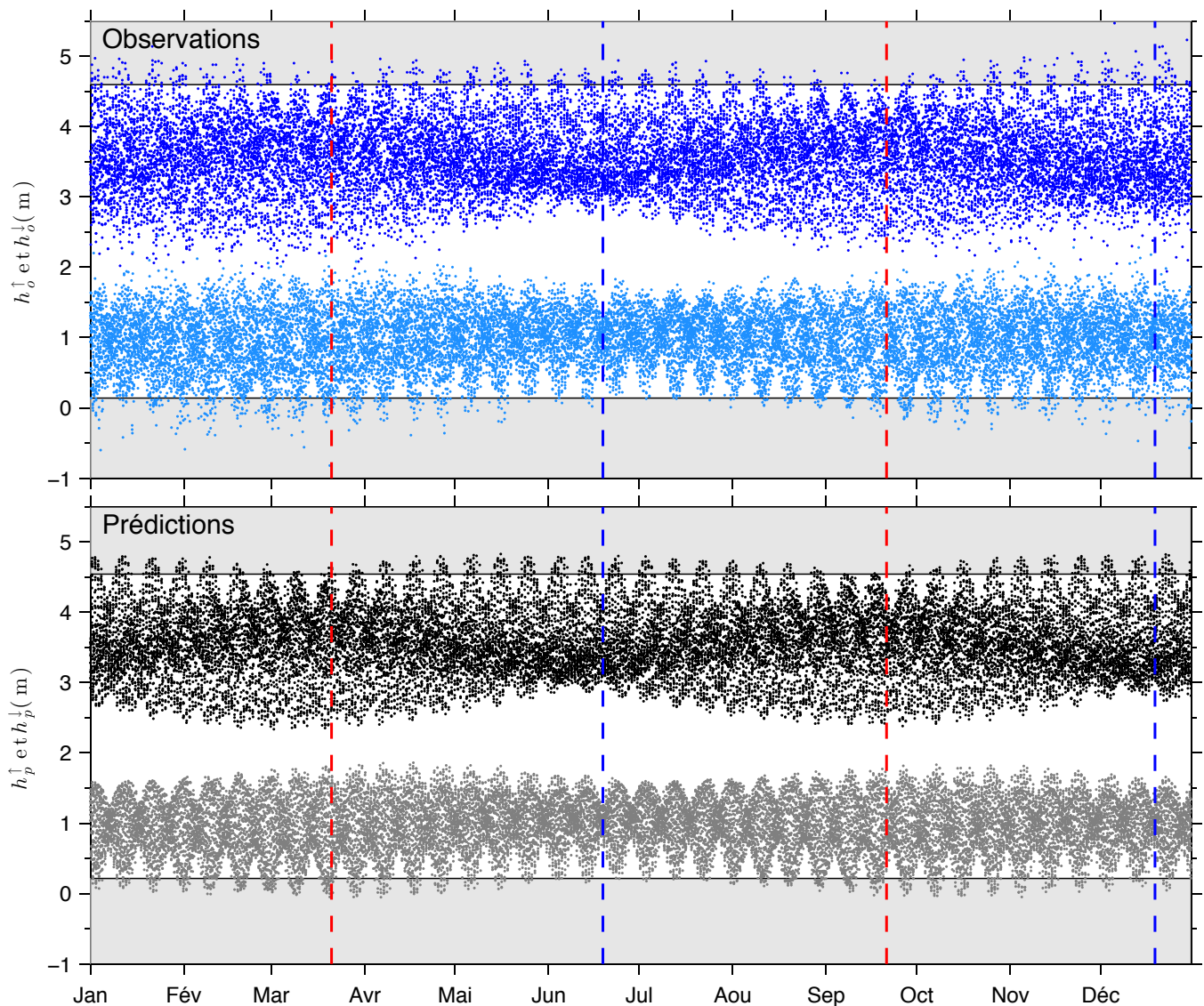


Figure 6. Représentation de toutes les marées hautes (points bleu foncé et noirs) et basses (points bleu pâle et gris) extraites des données horaires de la figure 4 et rapportées sur une période d'une année. Les zones ombragées correspondent au critère de grandes marées, hautes ou basses. Les lignes verticales pointillées rouges et bleues indiquent, respectivement, les équinoxes et les solstices.

décembre seront centrés sur les solstices et les mois de mars et septembre sur les équinoxes. Ces moyennes agissent aussi comme un filtre passe-bas qui élimine le battement semi-mensuel vive-eau/morte-eau, ainsi que les autres composantes mensuelles et semi-mensuelles.

La première statistique représente la proportion P du nombre de grandes marées (hautes ou basses) répertoriées pour un certain mois, par rapport au nombre de toutes les grandes marées répertoriées dans l'année (figure 7a). Cette statistique montre qu'autour des équinoxes, la probabilité d'obtenir de grandes marées hautes est la plus faible alors que la probabilité d'obtenir de grandes marées basses est la plus grande.

Lorsque l'on examine les niveaux d'eau mensuels moyens \bar{h}_o et \bar{h}_p (figure 7b), on observe un cycle annuel et semi-annuel caractérisé par un niveau d'environ 5 cm à 10 cm plus bas autour des équinoxes qu'aux solstices. Ces oscillations annuelles et semi-annuelles du niveau moyen correspondent bien aux composantes solaire annuelle S_a et semi-annuelle S_{sa} , qui ont chacune une amplitude de l'ordre de 2 cm (tableau 1), et donc un déplacement total maximum de l'ordre de 10 cm lorsqu'elles sont en phase constructive.

Tel que prévu par la théorie, les marées semi-diurnes et diurnes oscillent bien autour d'un niveau moyen qui varie lentement au cours de l'année. Ce sont ces variations du niveau moyen qui expliquent la répartition des probabilités d'obtenir les grandes marées hautes et les grandes marées basses, car la différence de marnage entre les équinoxes et les solstices est plus faible que le changement du niveau moyen de la mer. En effet, le marnage mensuel moyen $\overline{\Delta h}$ est plus grand d'environ 5 cm lors des équinoxes que lors des solstices (figure 7c), tel que prévu qualitativement par la théorie pour les marées dominées par les composantes semi-diurnes.

L'énergie mécanique E d'une onde longue telle que la marée est proportionnelle au carré du marnage, c'est-à-dire que $E \propto (\Delta h)^2$ (Kundu et Cohen, 2004). Les valeurs mensuelles moyennes de cette quantité sont montrées à la figure 7d. À partir de ces valeurs, on peut estimer la quantité d'énergie de marée supplémentaire $\overline{\Delta E}$ qu'il y a pendant l'équinoxe par rapport au solstice avec le calcul suivant,

$$\frac{\Delta E}{E_{\text{sol}}} = \frac{\overline{(\Delta h_{\text{eq}})^2} - \overline{(\Delta h_{\text{sol}})^2}}{\overline{(\Delta h_{\text{sol}})^2}} = 14\%,$$

où $\overline{(\Delta h_{\text{eq}})^2} \approx 8 \text{ m}^2$ et $\overline{(\Delta h_{\text{sol}})^2} \approx 7 \text{ m}^2$ (figure 7d). Nous concluons de cet exercice que les marées autour des équinoxes sont, en moyenne, 14 % plus énergétiques que les marées autour des solstices.

Enfin, la figure 7e montre l'inégalité diurne caractérisée par les différences de marnages consécutifs, symbolisés par $\Delta(\Delta h)$. Là aussi, un cycle semi-annuel clair apparaît avec les plus grandes inégalités atteintes lors des solstices, en accord avec la théorie des marées.

Une dernière analyse a été effectuée afin de mieux faire ressortir les variations des marnages des composantes semi-diurnes et diurnes prises séparément. Pour cela, nous

avons reconstitué le signal de marée en ne considérant, dans un premier temps, que les composantes semi-diurnes (M_2 , S_2 , N_2 , etc.) et, dans un deuxième temps, que les composantes diurnes (K_1 , O_1 , P_1 , etc.). De ces 2 séries reconstituées, nous avons ensuite calculé la déviation de ces marnages par rapport à la moyenne annuelle des marnages mensuels moyens. Ces statistiques sont symbolisées, respectivement, par $\overline{\Delta h}_1$ et $\overline{\Delta h}_2$ (figure 7f). Ces statistiques montrent bien comment la marée de l'estuaire du Saint-Laurent se comporte comme la théorie le prédit avec des marnages semi-diurnes plus importants autour des équinoxes et vice-versa pour les marées diurnes.

Soulignons ici le fait qu'il n'y a pas de différence significative entre les observations et les prédictions harmoniques pour l'ensemble de ces statistiques. Cette constatation ne supporte pas l'affirmation de Dionne (2008) qui écrivait : « Les hauts niveaux observés parfois aux environs des équinoxes, en particulier au printemps, sont attribuables à des facteurs externes (principalement météorologiques)... » Nos statistiques effectuées sur les observations ne montrent rien de particulier aux équinoxes ou même à d'autres moments de l'année qui se démarquerait de façon significative des prédictions harmoniques. En d'autres termes, la marée météorologique peut affecter le niveau de l'eau de façon équiprobable à tout moment de l'année et cet effet peut aussi bien aller dans un sens (augmentation du niveau) que dans l'autre (diminution du niveau). L'effet des événements météorologiques stochastiques (alternance pluie/beau temps – tempête/temps calme) n'a donc pas d'effet significatif sur les moyennes mensuelles.

Dans les endroits où le niveau d'eau est fortement influencé par les crues printanières, comme à la station Lauzon dans la région de Québec, la probabilité d'obtenir de très hauts niveaux d'eau est effectivement plus grande au printemps (cela n'est pas montré ici, mais nous avons aussi fait les statistiques). Cet effet est principalement attribuable au niveau moyen qui est plus élevé au printemps pour des raisons climatiques, et donc prédictibles sur quelques décennies, en raison de l'augmentation saisonnière des débits des rivières.

Discussion

Récapitulatif

Notre analyse permet de tirer les conclusions suivantes par rapport aux concepts de grandes marées dans l'estuaire maritime du Saint-Laurent :

1. En moyenne statistique, les plus grands marnages se situent autour des équinoxes;
2. La plus forte probabilité de trouver de très bas niveaux d'eau se situe aussi autour des équinoxes;
3. La plus faible probabilité de trouver de très hauts niveaux d'eau se situe autour des équinoxes. Cela s'explique par le fait que la diminution du niveau moyen de la mer aux équinoxes est plus grande que l'augmentation du marnage.

Notre analyse permet de conclure que, dans l'estuaire du Saint-Laurent, il y a bel et bien un signal semi-annuel mesurable de la marée associé à l'alternance équinoxe/solstice. Les marées sont environ 14 % plus énergétiques autour des

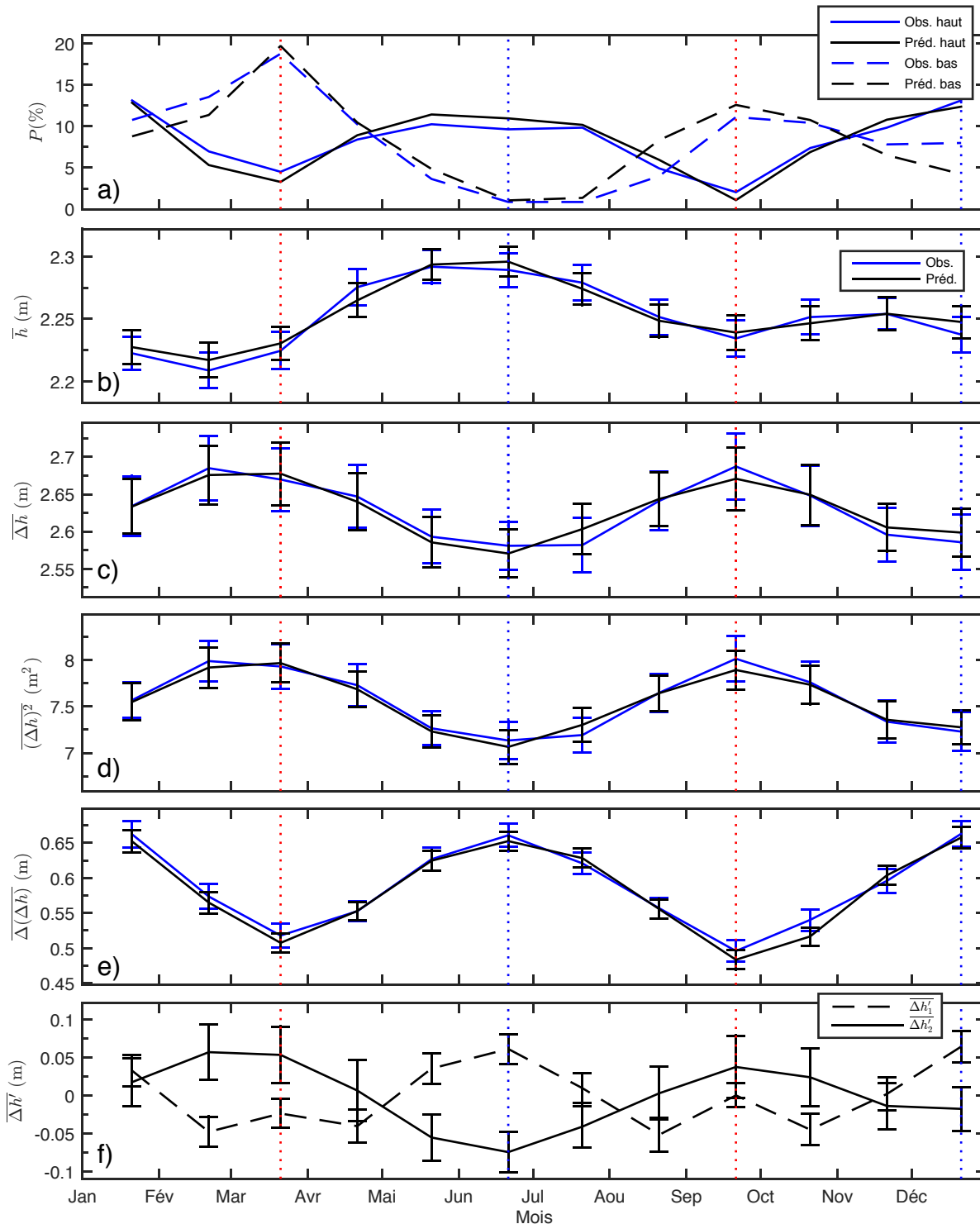


Figure 7. Moyennes mensuelles et intervalles de confiance (95 %) des observations (bleus) et des prédictions (noirs). a) Probabilité qu'un mois de l'année soit sujet à de grandes marées hautes (traits pleins) ou basses (traits pointillés); b) Niveau d'eau \bar{h} ; c) Marnage $\overline{\Delta h}$; d) Carré du marnage $\overline{(\Delta h)^2}$; e) Inégalité diurne $\overline{\Delta(\Delta h)}$; f) Déviation par rapport à la moyenne du marnage diurne ($\overline{\Delta h_1}$, pointillé) et semi-diurne ($\overline{\Delta h_2}$, plein). Les lignes verticales pointillées rouges et bleues indiquent, respectivement, les équinoxes et les solstices.

équinoxes qu'autour des solstices. Il nous apparaît donc acceptable d'indiquer que les marées sont, en moyenne, plus fortes autour des équinoxes.

Ces observations correspondent bien à la théorie classique des marées. À cet égard, l'estuaire du Saint-Laurent représente un beau cas de figure pour illustrer comment la théorie des marées à propos des longues périodes semi-annuelles (cycle équinoxe/solstice) peut être utile pour interpréter les observations.

Ces conclusions sont basées sur des moyennes statistiques effectuées sur une longue série temporelle de 30 ans de données. Il faut donc rester vigilant quant à leur interprétation pour une année particulière. Ces conclusions statistiques n'indiquent pas que les marées les plus fortes d'une année en particulier se rencontreront obligatoirement et précisément aux jours des équinoxes. Cela est attribuable au fait que l'augmentation graduelle du marnage vers les équinoxes est faible comparativement aux variations rapides de marnages associés au cycle vive-eau/morte-eau (2 semaines) qui n'est pas synchronisé avec les équinoxes. En somme, d'une année à l'autre, les plus grandes marées peuvent se trouver à plusieurs jours d'écart des équinoxes, bien qu'en moyenne statistique, les marées sont bel et bien plus énergétiques aux équinoxes.

Matériel didactique

Étant donné la confusion que peuvent engendrer ces notions abstraites et assez complexes du comportement des marées autour des équinoxes, nous proposons ici une façon simple d'expliquer le phénomène, mais qui à notre connaissance ne se rencontre pas dans les manuels de base (p. ex. : Brown et collab., 1989).

D'abord, puisque les statistiques mensuelles des marées harmoniques prédictibles et des marées observées ne sont pas significativement différentes, tel que cela a été démontré ici pour l'estuaire du Saint-Laurent, l'explication peut reposer uniquement sur l'effet astronomique. Pour simplifier, nous allons donc laisser de côté l'effet de la marée météorologique dans l'explication qui suivra. Ensuite, comme cela est souvent fait en physique, il est commode d'idéaliser le problème et de s'adonner à des expériences de pensée desquelles on peut tirer une explication simplifiée, mais représentative du phénomène plus complexe considéré. C'est l'approche que nous allons privilégier ici.

La première simplification consiste à considérer que l'orbite de la Terre est parfaitement circulaire et centrée sur le Soleil. Nous éliminons ainsi le cycle annuel causé par l'ellipticité de l'orbite qui viendrait distraire l'explication principale qui se veut focalisée sur le cycle équinoxe/solstice. De plus, comme nous ne nous intéressons qu'au cycle équinoxe/solstice, nous excluons l'effet de la Lune qui induit principalement une modulation bimensuelle (le cycle vive-eau/morte-eau) et qui ne fait pas partie de la notion centrale.

On arrive ensuite à démystifier une bonne partie (mais pas toute) du phénomène en considérant le cas hypothétique

où l'inclinaison de la Terre ne serait pas de 23° par rapport à la perpendiculaire au plan orbital, comme c'est le cas actuellement, mais plutôt de 90°. Dans cette situation improbable, les solstices et les équinoxes seraient caractérisés par la direction dans laquelle pointe l'axe de rotation de la Terre : aux solstices, l'axe de rotation de la Terre serait confondu avec l'axe Terre-Soleil, tandis qu'aux équinoxes cet axe serait perpendiculaire à l'axe Terre-Soleil. C'est dans une telle configuration que la modulation semi-annuelle du comportement des marées apparaît le plus clairement (figure 8).

La schématisation de ces simplifications permet les constatations suivantes :

1. Aux équinoxes, la marée serait purement semi-diurne. C'est aussi aux équinoxes que la marée semi-diurne serait la plus forte. Par ailleurs, le niveau moyen de la mer serait plus bas que le niveau moyen en l'absence de marée pour les régions aux latitudes plus hautes que 35,27° (N ou S).
2. Aux solstices, il n'y aurait plus de marée semi-diurne ni diurne. Il subsisterait cependant une augmentation du niveau moyen de la mer pour les latitudes > 35,27° (N ou S) et une diminution pour les latitudes < 35,27° (N ou S).
3. À mesure que la Terre se déplacerait des équinoxes vers les solstices, la marée adopterait de plus en plus un caractère mixte, c'est-à-dire une augmentation des inégalités diurnes, tout en perdant de plus en plus d'énergie pour atteindre une énergie nulle aux solstices.

Cette conceptualisation illustre bien la modulation semi-annuelle du niveau moyen de la mer et du marnage des marées semi-diurnes telles qu'observées à Rimouski, mais pas la modulation semi-annuelle du marnage des marées diurnes. En effet, la théorie de la marée montre que le marnage des marées diurnes est maximal pour un astre incliné à 45° par rapport au plan équatorial terrestre (figure 1). Le marnage maximal des marées diurnes est donc atteint à mi-chemin entre équinoxe et solstice dans notre modèle. En réalité, comme le Soleil est incliné au plus à 23,45° (lors des solstices) par rapport au plan équatorial terrestre, le marnage des marées diurnes est maximal aux solstices, tel qu'observé à Rimouski (figure 6f). Cette manifestation se nomme la marée de solstice qui est définie ainsi : « Marée se produisant au voisinage des solstices, pendant lesquelles la partie diurne de la marée est maximale ». (Organisation Hydrographique Internationale, 1998 : 131)

Enfin, puisque Rimouski est à une latitude plus grande que 35,27° (48,48° N), nos statistiques (figure 7) ont bien montré une augmentation du niveau moyen autour des solstices et une diminution autour des équinoxes, en accord avec notre modèle simple et la théorie des marées.

Cette conceptualisation, bien qu'ayant ses limites, permet d'introduire l'essentiel des éléments nécessaires à la compréhension de l'effet du cycle semi-annuel associé à l'alternance équinoxe-solstice sur la marée à Rimouski.

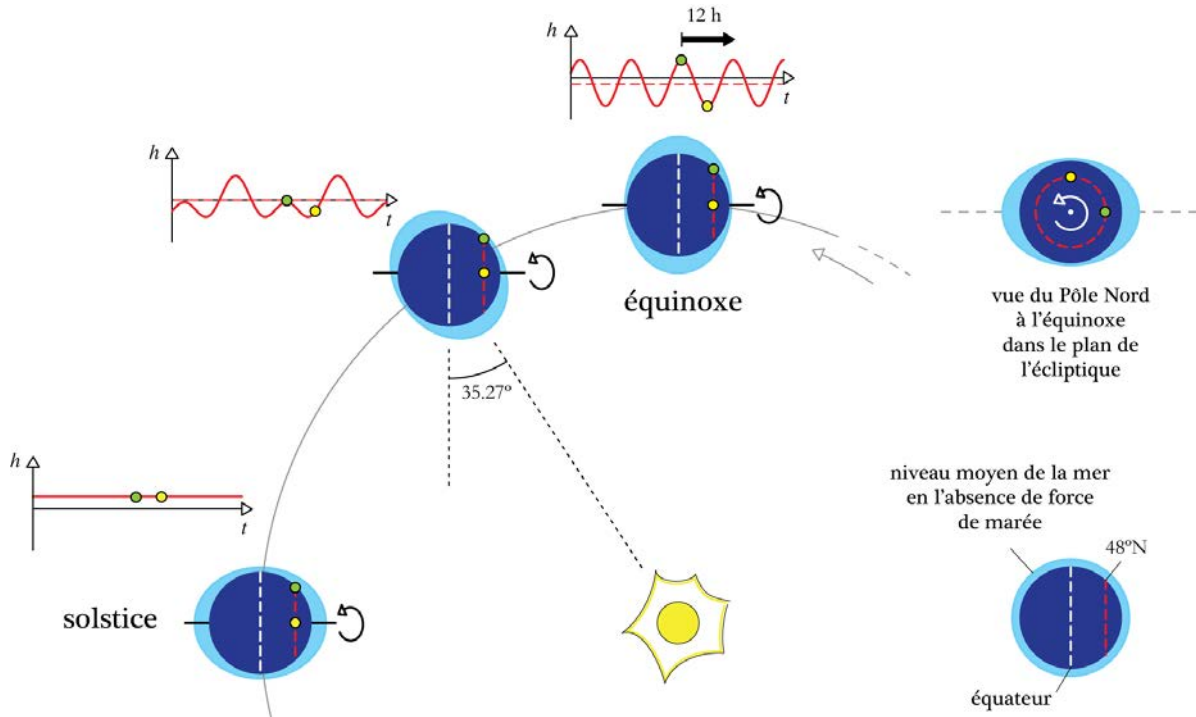


Figure 8. Schéma de la marée statique du Soleil au solstice et à l'équinoxe en supposant que l'axe de rotation de la Terre est incliné à 90° par rapport à la perpendiculaire au plan orbital. Les graphiques de séries temporelles du niveau d'eau $h(t)$ (traits pleins en rouge) représentent qualitativement comment évoluerait le niveau d'eau à la latitude de Rimouski. Sur ces graphiques, les traits pointillés rouges représentent le niveau moyen (plus bas aux équinoxes, plus haut aux solstices). Ce schéma, bien qu'irréaliste, aide à faire comprendre par un cas limite le comportement des marées causé par l'inclinaison terrestre et par la modulation équinoxe-solstice que cela cause.

Annexe 1

Équation générale de la marée statique

L'équation générale de la marée statique qui exprime l'élevation du niveau d'eau h en fonction du temps, de la déclinaison et de la position sur Terre est donnée par l'expression suivante (Lamb, 1932) :

$$h = 3A \left(\cos^2 \delta - \frac{1}{3} \right) \left(\cos^2 \theta - \frac{1}{3} \right) + A \sin(2\delta) \sin(2\theta) \cos(\alpha + \lambda) + A \sin^2 \delta \sin^2 \theta \cos[2(\alpha + \lambda)]$$

où A est l'amplitude (la moitié du marnage), δ la co-déclinaison (c.-à-d. $90^\circ -$ déclinaison), θ la co-latitude (c.-à-d. $90^\circ -$ latitude), λ la longitude et α le temps en angle horaire. Dans cette équation, le premier terme représente les composantes de longues périodes, le deuxième terme les composantes diurnes et le troisième terme les composantes semi-diurnes (remarquez le facteur 2 devant le terme temporel).

Étant donné que les fonctions de co-déclinaison (δ) ou de co-latitude (θ) ont des formes identiques dans chaque terme, la figure 1 n'a été construite que pour l'une (ou l'autre) de ces variables. C'est ainsi que l'ordonnée de la figure 1 peut tout aussi bien s'interpréter comme étant la déclinaison ($\delta + 90^\circ$) à une latitude constante ou, à l'inverse, la latitude

($\theta + 90^\circ$) à une déclinaison constante. Les termes temporels ont aussi été omis de la figure 1 puisqu'on ne s'intéresse qu'aux marnages dans cette démonstration. Ainsi donc, la figure 1 représente uniquement les 3 termes normalisés suivants : $\frac{3}{2}(\cos^2 \delta - \frac{1}{3})$ (périodes longues), $\sin(2\delta)$ (composante diurne) et $\sin^2 \delta$ (composante semi-diurne) où δ peut tout aussi bien s'interchanger avec θ . ◀

Références

- BROWN, J., A. COLLING, D. PARK, J. PHILLIPS, D. ROTHERY et J. WRIGHT, 1989. Waves, tides and shallow-water processes. Pergamon Press in association with The Open University, New York, 187 p.
- CHABOT, R. et A. ROSSIGNOL, 2003. Algues et faunes du littoral du Saint-Laurent maritime : guide d'identification. Institut des sciences de la mer de Rimouski, Rimouski et Pêches et Océans Canada (Institut Maurice-Lamontagne), Mont-Joli, 113 p.
- CODIGA, D.L., 2011. Unified tidal analysis and prediction using the UTide Matlab functions. Rapport technique 2011-01, Graduate School of Oceanography, University of Rhode Island, Kingston, 59 p.
- DEFANT, A., 1961. Physical oceanography, Volume 2. Pergamon Press, New York, 589 p.
- DIONNE, J.-C., 2005. Les marées d'équinoxe sont-elles les plus grandes? Bulletin de l'AQUA, 21 : 18-23.
- DIONNE, J.-C., 2008. Les marées d'équinoxes dans l'estuaire du Saint-Laurent ne sont pas les plus grandes. Le Naturaliste canadien, 132 : 80-83.
- DIONNE, J.-C., 2010. Données complémentaires sur les marées d'équinoxe dans l'est du Canada. Bulletin de l'AQUA, 35 : 11-17.

- EFRON, B. et G. GONG, 1983. A leisurely look at the bootstrap, the jackknife and cross-validation. *The American Statistician*, 37 : 36-48.
- FORRESTER, W.D., 1983. Manuel canadien des marées. Ministère des Pêches et des Océans, Ottawa, 149 p.
- GALBRAITH, P.S., P. LAROUCHE, J. CHASSÉ et B. PETRIE, 2012. Sea-surface temperature in relation to air temperature in the Gulf of St. Lawrence: Interdecadal variability and long term trends. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 77 : 10-20.
- GALBRAITH, P.S., J. CHASSÉ, P. NICOT, C. CAVERHILL, D. GILBERT, B. PETTIGREW, D. LEFAIVRE, D. BRICKMAN, L. DEVINE et C. LAFLEUR, 2015. Physical oceanographic conditions in the Gulf of St. Lawrence in 2014. Department of Fisheries and Oceans Canada, Canadian Science Advisory Secretariat Research Document, 2013/026, Ottawa, v + 89 p.
- KUNDU, P.K. et I.M. COHEN, 2004. Fluid mechanics. 3^e édition. Elsevier Academic Press, San Diego, 759 p.
- LAMB, H., 1932. Hydrodynamics. 6^e édition. Cambridge University Press, Cambridge, 738 p.
- ORGANISATION HYDROGRAPHIQUE INTERNATIONALE, 1998. Dictionnaire hydrographique, Monaco, 281 p.
- PAWLOWICZ, R., B. BEARDSLEY et S. LENTZ, 2002. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in matlab using T_TIDE. *Computers & Geosciences*, 28 : 929-937.
- PÊCHES ET OCÉANS CANADA, 2015. Archives canadiennes des données sur les marées et les niveaux d'eau. Disponible en ligne à : <http://isdm-gdsi.gc.ca/isdm-gdsi/twl-mne/index-fra.htm>. [Visité le 14-10-20].
- SRC, 2010. Grandes marées du 6 décembre 2010. Disponible en ligne à : <http://ici.radio-canada.ca/sujet/grandesmarees>. [Visité le 15-02-23].
- SRC, 2011. L'empreinte des grandes marées de 2010. Disponible en ligne à : <http://ici.radio-canada.ca/regions/est-quebec/2011/12/06/003-grandes-marees-2010-bilan-avenir.shtml>. [Visité le 15-02-23].
- SRC, 2013. Traversée dans la boue. Disponible en ligne à : <http://ici.radio-canada.ca/regions/est-quebec/2013/06/25/003-traverse-ile-saint-barnabe.shtml>. [Visité le 15-02-23].

Sélection Laminard inc.

Diane Lemay et Pierre Savard, prop.

- Encadrement
- Laminage
- Matériel d'artiste
- Cours de peinture
- Galerie d'art

254, rue Racine
Loretteville (Québec)
G2B 1E6

Tél. : (418) 843-6308
Fax : (418) 843-8191

Courriel : selection.laminard@videotron.ca
www.selectionart.com

www.iagto.ca

IA **INDUSTRIELLE
ALLIANCE**
VALEURS MOBILIÈRES INC.

Gervais Comeau
Conseiller en placement

1040, avenue Belvédère, bureau 101
Québec (Québec) G1S 3G3

Téléphone : 418 681-2442
Sans frais : 1 800 207-2445
Cellulaire : 418 882-8282
Télécopieur : 418 681-7710
gervais.comeau@iagto.ca



MEMBRE
Industrielle Alliance
Valeurs mobilières inc.
est membre du FCPE.

VOTRE PARTENAIRE DE CONFIANCE.