

Source des images : vol héliporté effectué par Hydro-Québec en date du 3 mars 2025

Ajout d'un troisième groupe turbine-alternateur à la centrale Sainte-Marguerite-3 Étude du régime des glaces (100% final)

Rapport No R.0649 – Final

No Logesdes: 4348-70030-013-01-0-BV-L

Préparé par :

Lasalle | NHC Inc.
9620 rue Saint-Patrick
LaSalle, QC H8R 1R8
Tel: 514.366.2970
www.lasallenhc.com

Préparé pour :

Hydro-Québec
75, boul. René-Lévesque Ouest, 3e étage,
Québec, Québec, H2Z 1A4

15 sept. 2025
Final, Rév. 4
Numéro de référence de Lasalle|NHC : 8008864

SUIVI DU DOCUMENT

Date	Révision No.	Révisé par	Émis pour
2024-05-31	0a	Wael Taha	Rapport 50 %
2024-06-28	1	Hydro-Québec	Rapport 50 %
2024-09-16	1a	Wael Taha	Rapport 60 % préliminaire
2024-12-23	2	Hydro-Québec	Rapport 60 % préliminaire
2025-04-29	2c	Wael Taha Maryse Bonneau-Lefebvre	Rapport 60 % final
2025-07-04	3	Wael Taha Maryse Bonneau-Lefebvre	Rapport 100 % préliminaire
2025-09-15	4	Wael Taha Maryse Bonneau-Lefebvre	Rapport 100 % final

Rapport préparé par :





Catherine Blouin
CPI
Candidate à la profession d'ingénieur

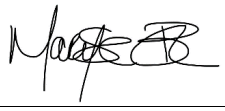
No OIQ : 6062257

Wael Taha
Ing., M.Ing.
Associé, Chargé de projet

No OIQ : 133365

Rapport révisé par :





Wael Taha
Ing., M.Ing.
Associé, Chargé de projet

No OIQ : 133365

Maryse Bonneau-Lefebvre
Ing., M.Ing.
Chargée de projet

N° OIQ 5003331

CLAUSE DE LIMITATION DE RESPONSABILITÉ

Ce document a été préparé par Lasalle|NHC de façon conforme aux bonnes pratiques d'ingénierie et est destiné à l'usage exclusif de Hydro-Québec et Propriétaire et de leurs représentants autorisés dans le cadre spécifique du projet Ajout d'un troisième groupe turbine-alternateur à la centrale Sainte-Marguerite-3 Étude du régime des glaces (100% final).

Le contenu de ce document ne peut être appliqué ou utilisé, en tout ou en partie, par ou à l'avantage d'autres parties sans l'autorisation écrite de Lasalle|NHC. Aucune autre garantie, expresse ou tacite, n'est accordée.

Lasalle|NHC et ses directeurs, associés, employés et mandataires n'assument aucune responsabilité à l'utilisation ou au recours du présent document ou de son contenu par des parties autres que Hydro-Québec et Propriétaire.

TABLE DES MATIÈRES

1 INTRODUCTION 1

2 DESCRIPTION DU PROJET 2
2.1 Spécificités du projet 2
2.2 Objectifs de l'étude de glace 3
2.3 Découpage de la zone d'étude pour l'analyse de glace 3

3 APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE 5
3.1 Conditions météorologiques et thermiques 5
3.1.1 Hiver glaciologique 5
3.1.2 Températures de l'eau 6
3.2 Hydraulicité 6
3.3 Suivis des glaces effectués par Hydro-Québec 8
3.4 Analyse du régime des glaces actuel 8
3.4.1 Emprise de la couverture de glace 8
3.4.2 Épaisseurs de glace 10
3.4.3 Accès au couvert de glace 10
3.4.4 Conditions de glace le long des berges 11

4 CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES ET THERMIQUES 16
4.1 Températures de l'air et hivers glaciologiques 16
4.2 Températures de l'eau 20
4.2.1 Températures de l'eau aux centrales SM-3 et SM-2 20
4.2.2 Profil thermique de la rivière Sainte-Marguerite 23
4.3 Comparaison des données thermiques 26

5 HYDRAULICITÉ 28
5.1 Débits 28
5.2 Niveaux d'eau 35
5.3 Vitesses d'écoulement 39

6 SUIVIS DES GLACES EFFECTUÉS PAR HYDRO-QUÉBEC 42
6.1 Observations générales 42
6.2 Survols héliportés 43
6.2.1 Réservoir SM-3 43
6.2.2 Tronçon entre les centrales SM-3 et SM-2 44
6.2.3 Retenue de SM-1 47
6.2.4 Estuaire de la rivière Sainte-Marguerite 48
6.3 Mesures d'épaisseurs de glace 48
6.4 Utilisation du couvert de glace 54

7 ANALYSE DU RÉGIME DES GLACES ACTUEL 55
7.1 Réservoir SM-3 55
7.1.1 Dynamique glaciologique et hiver moyen 55
7.1.2 Épaisseur du couvert de glace 57
7.1.3 Conditions de glace le long des rives 59
7.1.4 Accès au couvert de glace 59
7.2 Tronçon entre les centrales SM-3 et SM-2 60
7.2.1 Dynamique glaciologique et hiver moyen 60
7.2.2 Épaisseur du couvert de glace 66
7.2.3 Bord frontal 69
7.2.4 Conditions de glace le long des rives 74
7.2.5 Accès au couvert de glace 74
7.3 Retenue de SM-1 76
7.3.1 Dynamique glaciologique et hiver moyen 76
7.3.2 Épaisseur du couvert de glace 77
7.4 Estuaire de la rivière Sainte-Marguerite 78
7.4.1 Dynamique glaciologique et hiver moyen 78
7.4.2 Épaisseur du couvert de glace 80
7.5 Synthèse du régime des glaces 81

8 IMPACTS ANTICIPÉS 87
8.1 Hydraulicité 87
8.2 Réservoir SM-3 88
8.3 Tronçon entre les centrales SM-3 et SM-2 89
8.4 Retenue de SM-1 et estuaire de la rivière Sainte-Marguerite 90

9 CONCLUSION 91

RÉFÉRENCES 97

ANNEXE A – DOSSIER PHOTOGRPHIQUE DES SUIVIS DE GLACE 99
A.1 Réservoir SM-3 99
A.2 Tronçon entre les centrales SM-3 et SM-2 103
A.3 Retenue de SM-1 123
A.4 Estuaire de la rivière Sainte-Marguerite 127

FIGURES

Figure 2.1. Découpage de la zone d'étude pour l'analyse de glace 4
Figure 3.1 Stations de température d'air et d'eau utilisées à des fins d'analyse 7
Figure 3.2 Fissure le long de la rive sur une image satellitaire dans la zone 1 (13 mai 2019) 12
Figure 3.3 Formation des fissures sur le pourtour d'un réservoir par flexion lors du marnage 13
Figure 3.4 Effet du marnage hivernal sur le déplacement de la fissure 3 dans le réservoir de SM-3 14
Figure 3.5 Sections transversales tracées à chaque 2,5 km dans le réservoir de SM-3 (PK 135-90) pour évaluer la pente des rives 15
Figure 4.1 Température de l'air moyenne journalière et degrés-jours de gel pour 2004-2025 – Amont de la centrale SM-3 17
Figure 4.2 Température de l'air moyenne journalière et degrés-jours de gel pour 2004-2025 – Aval de la centrale SM-3 18
Figure 4.3 Rigueur des hivers pour 2004-2025 – Amont et aval de la centrale SM-3 18
Figure 4.4 Durée des hivers glaciologiques pour 2004-2025 – Amont et aval de la centrale SM-3 19
Figure 4.5 Température de l'eau pour 2006-2012 et 2024-2025 – PK 75 21
Figure 4.6 Température de l'eau pour 2003-2012 – Centrale SM-2 22
Figure 4.7 Profil des températures de l'eau (profondeur 0,5 m) et rigueur pour l'hiver 2002-2003 24
Figure 4.8 Profil des températures de l'eau (profondeur 0,5 m) et rigueur pour l'hiver 2003-2004 24
Figure 4.9 Profil des températures de l'eau (profondeur 0,5 m) et rigueur pour l'hiver 2004-2005 25
Figure 4.10 Profil des températures de l'eau (profondeur 0,5 m) et rigueur pour l'hiver 2024-2025 25
Figure 4.11 Comparaison des températures d'eau et d'air pour 2006-2012 et 2024-2025 à SM-3 (PK-75) 27
Figure 4.12 Comparaison des températures d'eau et d'air pour 2003-2013 à SM-2 27
Figure 5.1 Paliers de débits turbinés horaires pour 2004-2025 (1 déc.-31 mars) – Centrale SM-3 29
Figure 5.2 Évolution temporelle des débits totaux horaires pour 2004-2025 – Centrale SM-3 30
Figure 5.3 Paliers de débits horaires pour 2010-2025 (1 déc.-31 mars) – PK 75 31
Figure 5.4 Évolution temporelle des débits horaires pour 2010-2025 – PK 75 32
Figure 5.5 Paliers de débits totaux horaires pour 2004-2025 (1 déc.-31 mars) – Centrale SM-2 33
Figure 5.6 Évolution temporelle des débits totaux horaires pour 2004-2025 – Centrale SM-2 34
Figure 5.7 Niveaux quotidiens pour la période 2004-2025 – Réservoir SM-3 35

Figure 5.8 Niveaux quotidiens pour la période 2010-2025 – Aval de la centrale SM-3 (PK 75) 36
Figure 5.9 Niveaux quotidiens pour la période 2004-2025 – Réservoir SM-2 37
Figure 5.10 Variation du niveau d'eau dans le réservoir de SM-2 après le démarrage rapide (2 heures) de SM-3 de 0 à 300 m^3/s 38
Figure 5.11 Niveaux quotidiens pour la période 2009-2025 – Retenue SM-1 39
Figure 5.12 Vitesses en conditions actuelles (300 m^3/s) et projetées (500 m^3/s) – Centrale SM-3 au PK 50 41
Figure 5.13 Vitesses en conditions actuelles (300 m^3/s) – Tronçon SM-2 à SM-1 41
Figure 6.1 Piste de motoneige (suivant la ligne pointillée) dans le réservoir de SM-3 – Survol du 27 février 2024 (zone 1, PK 131) 43
Figure 6.2 « Slush » le long des rives – Survol du 23 avril 2024 (zone 2, PK 98) 44
Figure 6.3 Tronçon partiellement couvert de glace sans neige – Survol du 27 février 2024 (zone 3, PK 68) 45
Figure 6.4 Formation du couvert à partir de plaques de glace minces à la dérive *(« skim ice »)* – Survol du 20 décembre 2023 (zone 5, PK 38) 46
Figure 6.5 Couvert partiel entre les PK 45 et 55 – Survol du 3 mars 2025 (zone 4, PK 52) 46
Figure 6.6 Ouvertures dans le couvert du réservoir SM-2 – Survol du 19 février 2025 (zone 6, PK 35) 47
Figure 6.7 Couvert typique entre les centrales SM-2 et SM-1 – Survol du 27 février 2024 (zone 7.1, PK 8) 47
Figure 6.8 Fissure le long de la rive dans la zone estuarienne – Survol du 27 février 2024 (zone 7.2, PK 2) 48
Figure 6.9 Points de mesure du suivi des glaces Hydro-Québec de janvier (a) 2002-2005 et (b) 2025 (valeur minimale par PK montrée sur la carte) 49
Figure 6.10 Points de mesure du suivi des glaces Hydro-Québec de février (a) 2002-2005 et (b) 2025 (valeur minimale par PK montrée sur la carte) 50
Figure 6.11 Points de mesure du suivi des glaces Hydro-Québec de mars 2025 (valeur minimale par PK montrée sur la carte) 51
Figure 7.1 Dates de prise et de départ – Zone 1 55
Figure 7.2 Degrés-jours de gel à la prise & degrés-jours de dégel au départ – Zone 1 56
Figure 7.3 Durée de l'ensemble des événements de glace – Zone 1 56
Figure 7.4 Dates de prise et de départ – Zone 2 56
Figure 7.5 Degrés-jours de gel à la prise & degrés-jours de dégel au départ – Zone 2 57
Figure 7.6 Durée de l'ensemble des événements de glace – Zone 2 57
Figure 7.7 Degrés-jours de gel effectifs – Zone 1 58
Figure 7.8 Épaisseurs de glace – Zone 1 58
Figure 7.9 Degrés-jours de gel effectifs – Zone 2 58
Figure 7.10 Épaisseurs de glace – Zone 2 59
Figure 7.11 Période potentielle d'accès au couvert de glace – Zone 1 60
Figure 7.12 Période potentielle d'accès au couvert de glace – Zone 2 60
Figure 7.13 Dates de prise et de départ – Zone 4 63

Figure 7.14 Degrés-jours de gel à la prise & degrés-jours de dégel au départ ou degrés-jours de gel séparant le départ des glaces et la fin de l'hiver glaciologique – Zone 4 63
Figure 7.15 Durée de l'ensemble des événements de glace – Zone 4 64
Figure 7.16 Dates de prise et de départ – Zone 5 64
Figure 7.17 Degrés-jours de gel à la prise & degrés-jours de dégel au départ ou degrés-jours de gel séparant le départ des glaces et la fin de l'hiver glaciologique – Zone 5 64
Figure 7.18 Durée de l'ensemble des événements de glace – Zone 5 65
Figure 7.19 Dates de prise et de départ – Zone 6 65
Figure 7.20 Degrés-jours de gel à la prise & degrés-jours de dégel au départ – Zone 6 65
Figure 7.21 Durée de l'ensemble des événements de glace – Zone 6 66
Figure 7.22 Degrés-jours de gel effectifs – Zone 4 67
Figure 7.23 Épaisseurs de glace – Zone 4 68
Figure 7.24 Degrés-jours de gel effectifs – Zone 5 68
Figure 7.25 Épaisseurs de glace – Zone 5 68
Figure 7.26 Degrés-jours de gel effectifs – Zone 6 69
Figure 7.27 Épaisseurs de glace – Zone 6 69
Figure 7.28 Progression typique du bord frontal couvert complet dans le réservoir de SM-2 71
Figure 7.29 Progression typique du bord frontal couvert partiel dans le réservoir de SM-2 72
Figure 7.30 Progression du bord frontal (couverts complet et partiel) pour les deux hivers les plus cléments dans le réservoir de SM-2s 73
Figure 7.31 Période potentielle d'accès au couvert de glace – Zone 4 75
Figure 7.32 Période potentielle d'accès au couvert de glace – Zone 5 75
Figure 7.33 Période potentielle d'accès au couvert de glace – Zone 6 75
Figure 7.34 Dates de prise et de départ – Zone 7.1 76
Figure 7.35 Degrés-jours de gel à la prise & degrés-jours de gel séparant le départ des glaces et la fin de l'hiver glaciologique – Zone 7.1 77
Figure 7.36 Durée de l'ensemble des événements de glace – Zone 7.1 77
Figure 7.37 Degrés-jours de gel effectifs – Zone 7.1 78
Figure 7.38 Épaisseurs de glace – Zone 7.1 78
Figure 7.39 Dates de prise et de départ – Zone 7.2 79
Figure 7.40 Degrés-jours de gel à la prise & degrés-jours de gel séparant le départ des glaces et la fin de l'hiver glaciologique – Zone 7.2 79
Figure 7.41 Durée de l'ensemble des événements de glace – Zone 7.2 80
Figure 7.42 Degrés-jours de gel effectifs – Zone 7.2 80
Figure 7.43 Épaisseurs de glace – Zone 7.2 81
Figure 7.44 Zones de faiblesse dans le couvert selon le suivi des glaces Hydro-Québec de 2002 à 2005 83
Figure A.1 Survols hiver 2023-2024 – Zone 1 (Réservoir intermédiaire SM-3, PK 115) 99
Figure A.2 Survols hiver 2024-2025 – Zone 1 (Réservoir intermédiaire SM-3, PK 105) 100
Figure A.3 Survols hiver 2003-2004 – Zone 2 (Champ proche barrage SM-3, PK 90) 101

Figure A.4 Survols hiver 2023-2024 – Zone 2 (Champ proche barrage SM-3, PK 97) 101
Figure A.5 Survols hiver 2024-2025 – Zone 2 (Champ proche barrage SM-3, PK 97) 102
Figure A.6 Survols hiver 2002-2003 – Zone 3 (Tronçon SM-3/SM-2, PK 68) 103
Figure A.7 Survols hiver 2003-2004 – Zone 3 (Tronçon SM-3/SM-2, PK 68) 104
Figure A.8 Survols hiver 2004-2005 – Zone 3 (Tronçon SM-3/SM-2, PK 68) 105
Figure A.9 Survols hiver 2023-2024 – Zone 3 (Tronçon SM-3/SM-2, PK 68) 106
Figure A.10 Survols hiver 2024-2025 – Zone 3 (Tronçon SM-3/SM-2, PK 68) 107
Figure A.11 Survols hiver 2002-2003 – Zones 4 (Tronçon SM-3/SM-2, PK 52) 108
Figure A.12 Survols hiver 2003-2004 – Zones 4 (Tronçon SM-3/SM-2, PK 52) 109
Figure A.13 Survols hiver 2004-2005 – Zones 4 (Tronçon SM-3/SM-2, PK 52) 110
Figure A.14 Survols hiver 2023-2024 – Zones 4 (Tronçon SM-3/SM-2, PK 52) 111
Figure A.15 Survols hiver 2024-2025 – Zones 4 (Tronçon SM-3/SM-2, PK 52) 112
Figure A.16 Survols hiver 2002-2003 – Zone 5 (Tronçon SM-3/SM-2, PK 33) 113
Figure A.17 Survols hiver 2003-2004 – Zone 5 (Tronçon SM-3/SM-2, PK 33) 114
Figure A.18 Survols hiver 2004-2005 – Zone 5 (Tronçon SM-3/SM-2, PK 33) 115
Figure A.19 Survols hiver 2023-2024 – Zone 5 (Tronçon SM-3/SM-2, PK 34) 116
Figure A.20 Survols hiver 2024-2025 – Zone 5 (Tronçon SM-3/SM-2, PK 34) 117
Figure A.21 Survols hiver 2002-2003 – Zone 6 (Tronçon SM-3/SM-2, PK 28) 118
Figure A.22 Survols hiver 2003-2004 – Zone 6 (Tronçon SM-3/SM-2, PK 28) 119
Figure A.23 Survols hiver 2004-2005 – Zone 6 (Tronçon SM-3/SM-2, PK 28) 120
Figure A.24 Survols hiver 2023-2024 – Zone 6 (Tronçon SM-3/SM-2, PK 28) 121
Figure A.25 Survols hiver 2024-2025 – Zone 6 (Tronçon SM-3/SM-2, PK 28) 122
Figure A.26 Survols hiver 2002-2003 – Zone 7.1 (Tronçon SM-2/SM-1, PK 9,5) 123
Figure A.27 Survol hiver 2003-2004 – Zone 7.1 (Tronçon SM-2/SM-1, PK 8) 124
Figure A.28 Survols hiver 2004-2005 – Zone 7.1 (Tronçon SM-2/SM-1, PK 8) 124
Figure A.29 Survols hiver 2023-2024 – Zone 7.1 (Tronçon SM-2/SM-1, PK 8) 125
Figure A.30 Survols hiver 2024-2025 – Zone 7.1 (Tronçon SM-2/SM-1, PK 8) 126
Figure A.31 Survols hiver 2002-2003 – Zone 7.2 (Tronçon estuarien, PK 5) 127
Figure A.32 Survol hiver 2003-2004 – Zone 7.2 (Tronçon estuarien, PK 5) 127
Figure A.33 Survols hiver 2004-2005– Zone 7.2 (Tronçon estuarien, PK 0-6) 128
Figure A.34 Survols hiver 2023-2024 – Zone 7.2 (Tronçon estuarien, PK 2) 129
Figure A.35 Survols hiver 2024-2025 – Zone 7.2 (Tronçon estuarien, PK 2) 130

TABLEAUX

Tableau 3.1 Pentes des rives utilisées dans l'analyse du marnage hivernal du réservoir de SM-3 15
Tableau 4.1 Comparaison des hivers glaciologiques moyens – Amont et aval de la centrale SM-3 19
Tableau 4.2 Rigueur des hivers pour différentes récurrences – Amont et aval de la centrale SM-3 19
Tableau 5.1 Marnage moyen dans le réservoir de SM-2 à la suite du démarrage rapide de SM-3 en conditions actuelles (0-300 m^3/s) 38
Tableau 6.1 Coefficient B pour chaque zone 54
Tableau 7.1 Caractéristiques des moments avec couvert de glace dans la zone 3 61
Tableau 7.2 Résumé du régime des glaces pour l'ensemble des zones étudiées durant la période 2006-2025 (excepté zone 3) 84
Tableau 8.1 Marnage moyen dans le réservoir de SM-2 à la suite du démarrage rapide de SM-3 en conditions futures (0-500 m^3/s) 88
Tableau 8.2 Écart de la largeur de la bande de glace morcelée en rive entre les marnages historique et projeté 88

1 INTRODUCTION

Le présent mandat vise la participation à l'avant-projet de l'ajout d'un troisième groupe turbine-alternateur à la centrale Sainte-Marguerite-3 (SM-3), située sur la rivière Sainte-Marguerite à quelques 75 km en amont de son embouchure. Les effets environnementaux du projet sont à évaluer en phases de construction et d'exploitation, car le projet est assujetti au processus d'étude d'impact sur l'environnement (EIE). Ainsi, une étude sectorielle sur l'état de référence est requise dans le cadre d'une étude d'impact provinciale.

L'objectif de l'étude du régime des glaces, faisant l'objet de ce rapport, est de définir le régime des glaces en conditions actuelles pour l'EIE et de décrire les changements anticipés à la couverture de glace pour les tronçons touchés par l'ajout d'un troisième groupe à SM-3.

Le second chapitre de ce rapport présente le projet ainsi que la zone d'étude et les objectifs de l'étude de glace. Le chapitre 3 sert à présenter la méthodologie utilisée pour toutes les analyses abordées dans le rapport, puis les sections suivantes en montrent les résultats. Les chapitres 4 et 5 servent à alimenter l'EIE. Le quatrième chapitre traite des conditions météorologiques et thermiques, puis le cinquième chapitre présente l'hydraulicité dans la zone d'étude. Le chapitre 6 effectue une synthèse du suivi des glaces réalisé par Hydro-Québec pour les hivers 2002 à 2005 et 2023 à 2025. Le chapitre 7 présente l'étude détaillée du régime des glaces en évaluant l'état de référence. Le chapitre 8 présente les impacts anticipés de l'ajout d'un troisième groupe turbine-alternateur à SM-3. Le chapitre 9 effectue la conclusion de ce rapport.

2 DESCRIPTION DU PROJET

2.1 Spécificités du projet

La rivière Sainte-Marguerite est située en Moyenne-Côte-Nord. Elle tire sa source près de la frontière du Labrador et se jette 280 km plus loin dans le golfe du Saint-Laurent à l'ouest de Sept-Îles. La zone d'étude pour l'analyse de glace correspond au tronçon (cours d'eau et rives) entre le réservoir intermédiaire de SM-3 (point kilométrique [PK] 135) et l'estuaire de la rivière Sainte-Marguerite (PK 0).

La centrale SM-3, située au PK 76,5, est principalement utilisée en période de pointe et fonctionne actuellement avec deux groupes turbine-alternateur fournissant un débit d'équipement total de 300 m^3/s. Dans le cadre du présent projet, ce débit pourrait être augmenté jusqu'à 500 m^3/s.

Les apports moyens annuels à SM-3 sont de l'ordre de 100 m^3/s et le volume utile du réservoir est de 3 279 hm^3. La centrale SM-3 a été mise en service en 2003 avec un premier groupe, puis un second groupe a été mis en service en 2007. Deux centrales sont présentes en aval de la centrale SM-3, avec des volumes utiles de 33,7 hm^3 dans le réservoir de la centrale Sainte-Marguerite-2 (SM-2) située au PK 10 et quasi nul à la retenue de la centrale Sainte-Marguerite-1 (SM-1) située au PK 7. Contrairement à SM-3, ces deux centrales hydroélectriques appartiennent à des sociétés privées. SM-2 est la propriété de Gulf Power, une filiale de I.O.C. Rio Tinto Alcan (Hydro-Québec, 2020), et SM-1 est la propriété conjointe d'Innergex et du Régime de rentes du Mouvement Desjardins (Innergex, 2024).

L'ajout d'un troisième groupe turbine-alternateur à la centrale SM-3 fait partie du *Plan d'action 2035* d'Hydro-Québec (Hydro-Québec, 2023). Le site de SM-3 est un bon candidat pour ce suréquipement, car la conception initiale et la construction ont été réalisées en prévision de l'ajout d'un troisième groupe. De plus, il s'agit de la plus forte chute aménagée au Québec et l'existence préalable des infrastructures ainsi que du réservoir limite les impacts de ce projet sur l'environnement (Hydro-Québec, 2001). L'aménagement SM-3 comprend les principaux ouvrages suivants :

- Un barrage de 171 m de hauteur créant un réservoir de 253 km^2;
- Une galerie d'amenée de 8,3 km servant à acheminer l'eau du réservoir à la centrale;
- Une centrale souterraine de 882 MW équipée de deux turbines Francis conçues pour une hauteur de chute nette nominale de 330 m;
- Un évacuateur de crues;
- Une route asphaltée de 86 km jusqu'à la centrale;
- Une ligne à 315 kV entre la centrale et le poste Arnaud.

Les principaux travaux en lien avec le projet de suréquipement sont l'installation d'un troisième groupe turbine-alternateur, d'équipements mécaniques et électriques ainsi que d'un campement temporaire de travailleurs.

2.2 Objectifs de l'étude de glace

Les objectifs de l'étude du régime des glaces sont les suivants :

- Définir le régime des glaces en conditions actuelles afin de définir l'état de référence pour l'EIE;
- Décrire les changements anticipés à la couverture de glace pour les tronçons potentiellement touchés par l'ajout d'un troisième groupe à SM-3.

2.3 Découpage de la zone d'étude pour l'analyse de glace

La zone d'étude a été divisée en huit zones à des fins d'analyse. Elle comprend spécifiquement les secteurs suivants :

1. Une partie du réservoir de SM-3 qui se divise en deux tronçons :
   1.1 Zone 1 – Réservoir intermédiaire SM-3 (PK 135 à 105);
   1.2 Zone 2 – Champ proche du barrage SM-3 (PK 105 à 85);

2. Le tronçon entre les centrales SM-3 et SM-2, incluant le tronçon fluvial ainsi que le réservoir de SM-2 :
   2.1 Zone 3 – Tronçon fluvial et entrée du réservoir SM-2 (PK 76,5 à 60);
   2.2 Zone 4 – Réservoir SM-2 amont (PK 60 à 45);
   2.3 Zone 5 – Réservoir SM-2 intermédiaire (PK 45 à 30);
   2.4 Zone 6 – Réservoir SM-2 aval (PK 30 à 10);

3. La retenue de SM-1 (tronçon entre les centrales SM-2 et SM-1), nommée zone 7.1 (PK 10 à 7);

4. Le tronçon estuarien (entre la centrale SM-1 et le golfe du Saint-Laurent), nommé zone 7.2 (PK 7 à 0).

Notons que le bras court-circuité de la rivière Sainte-Marguerite ainsi que le canal d'amenée sont situés entre les PK 85 et 76,5. Cette section est donc exclue de la zone d'étude.

Les divisions sont montrées à la Figure 2.1.

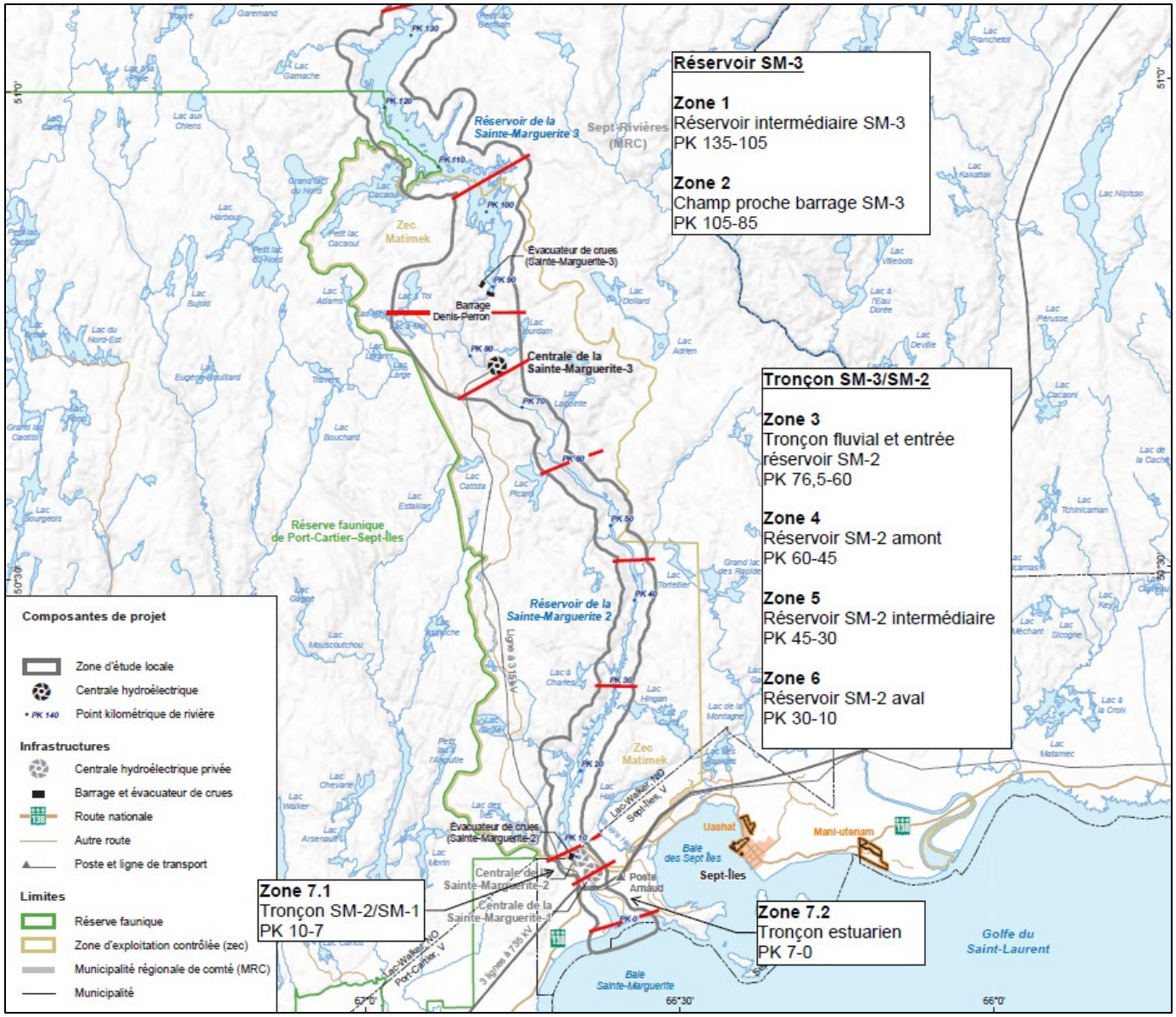


Figure 2.1. Découpage de la zone d'étude pour l'analyse de glace (source : Hydro-Québec)

3 APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE

3.1 Conditions météorologiques et thermiques

3.1.1 Hiver glaciologique

L'hiver glaciologique correspond à la période de l'année pendant laquelle la glace est présente sur les lacs et les cours d'eau. C'est l'intensité et la durée des périodes pendant lesquelles la température de l'air est en dessous du point de congélation (0 °C) qui contrôlent la formation, l'épaississement puis la disparition de la glace sur les plans d'eau. L'hiver glaciologique est donc le moteur de génération de la glace.

D'un point de vue analytique, il s'agit de calculer le nombre de degrés-jours de gel cumulés depuis le début de l'hiver, et ce, tant que les températures sont généralement en baisse. Ainsi, une journée pendant laquelle la température moyenne de l'air est de -10 °C cumule le même nombre de degrés-jours de gel que deux jours consécutifs pendant lesquels la température moyenne est de -5 °C, soit 10 degrés-jours de gel. La valeur maximale cumulée sur l'ensemble d'un hiver correspond à la rigueur ou l'indice de gel. Avec les degrés-jours de gel, il est possible de déterminer les dates de début et de fin de l'hiver glaciologique.

Pour la zone en amont de la centrale SM-3 (PK 135 à 85), les données de température d'air ont été fournies par Hydro-Québec. La Société de protection des forêts contre le feu (SOPFEU) opère les stations Garemand et Fouquet alors qu'Hydro-Québec opère les stations RSM0622 et Lac Dan. Les données utilisées sont principalement tirées des stations RSM0622 (données disponibles 2004-2007) et Garemand (2007-2025). Les stations Fouquet (2006-2025) et Lac Dan (2014-2025) ont été utilisées pour combler les données manquantes. L'ensemble de ces données a été rapporté à la station Garemand en traçant la relation entre les températures d'air à Garemand et chacune des autres stations pour uniformiser les intrants. Ce choix est dû au fait que la station de Garemand possède la plus longue série de données disponible.

Lorsque l'air est très sec, il peut se refroidir de près de 1 °C sur 100 mètres d'élévation gagnés (Swiss federal authorities, 2024). Ainsi, une correction consistant à diminuer la température de 0,01 °C par mètre d'élévation gagné entre les stations Garemand (élévation 778 m) et la crête du barrage de SM-3 (élévation 410 m) a été effectuée pour rapporter les données au niveau de la surface du réservoir de SM-3, créant ainsi une station fictive à cet endroit nommée « Crête du barrage SM-3 ».

Pour la zone en aval de la centrale SM-3 (PK 76,5 à 0), les données de température d'air sont tirées de la station d'Environnement Canada située à Sept-Îles (ID 7047914) et sont utilisées telles quelles puisque l'élévation varie peu entre la station météorologique de Sept-Îles et le réservoir de SM- 2.

3.1.2 Températures de l'eau

Les données de température d'eau ont été fournies par Hydro-Québec. Elles sont tirées de la station RSMA0346, située en aval de la centrale SM-3 au PK 75, et de la station RSM0622, située en aval de la centrale SM-2 au PK 10. Comme le réservoir de la centrale de SM-1 est très court et possède une faible contenance, il est raisonnable de supposer que les températures de l'eau dans l'estuaire sont très proches des températures de l'eau en aval de SM-2.

Les températures de l'eau sont analysées sur les différents tronçons pour évaluer l'impact thermique sur la dynamique des glaces, tel que l'intensité de l'érosion thermique sur un couvert de glace fixe en présence de vitesses d'écoulement modérées à élevées et le potentiel de génération de frasil. L'érosion thermique est le processus physique selon lequel l'eau ayant une température au-dessus du point de congélation fait fondre la glace par convection. Si les vitesses de l'écoulement sont faibles, comme dans un réservoir, le flux thermique (produit de la vitesse et de la température de l'eau) est faible, ce qui génère peu d'érosion thermique.

La localisation des stations utilisées pour les données de températures de l'air et de l'eau est montrée à la Figure 3.1.

3.2 Hydraulicité

Les données de débit et de niveau d'eau ont été fournies par Hydro-Québec. Une analyse a été réalisée pour toutes les années transmises.

La production hydroélectrique maximale a lieu entre les mois de décembre et mars, c'est donc pour cette période que les paliers de débits horaires sont analysés. Les séries chronologiques de débits d'octobre à mai sont également étudiées pour évaluer la variabilité saisonnière des données. Les débits horaires aux centrales SM-3 et SM-2 ainsi qu'au PK 75 ont été analysés.

Les séries chronologiques de niveaux d'eau d'octobre à mai sont étudiées pour observer la gestion des réservoirs dans la zone d'étude. Les données de niveau d'eau utilisent une référence locale arbitraire qui varie d'un site à l'autre. Afin d'uniformiser les données, l'ensemble des valeurs de niveau d'eau a été rapporté à la référence verticale CGVD28. Les niveaux quotidiens en amont de la centrale SM-3, au PK 75, en amont de la centrale SM-2 et dans la retenue de SM-1 ont été analysés.

Les vitesses d'écoulement analysées sont tirées des résultats de simulations du volet hydraulique du projet, pour les tronçons entre la centrale SM-3 et le PK 50 ainsi qu'entre SM-2 et SM-1. Les vitesses de l'écoulement sont étudiées pour évaluer l'intensité de l'érosion thermique sous un couvert de glace fixe en présence de températures de l'eau au-dessus du point de congélation. De plus, des vitesses élevées (>0,7 m/s) peuvent empêcher la formation d'un couvert de glace fixe et maintenir un tronçon en eau libre avec production de frasil, même si la température de l'eau est au point de congélation et la température de l'air en dessous du point de congélation.

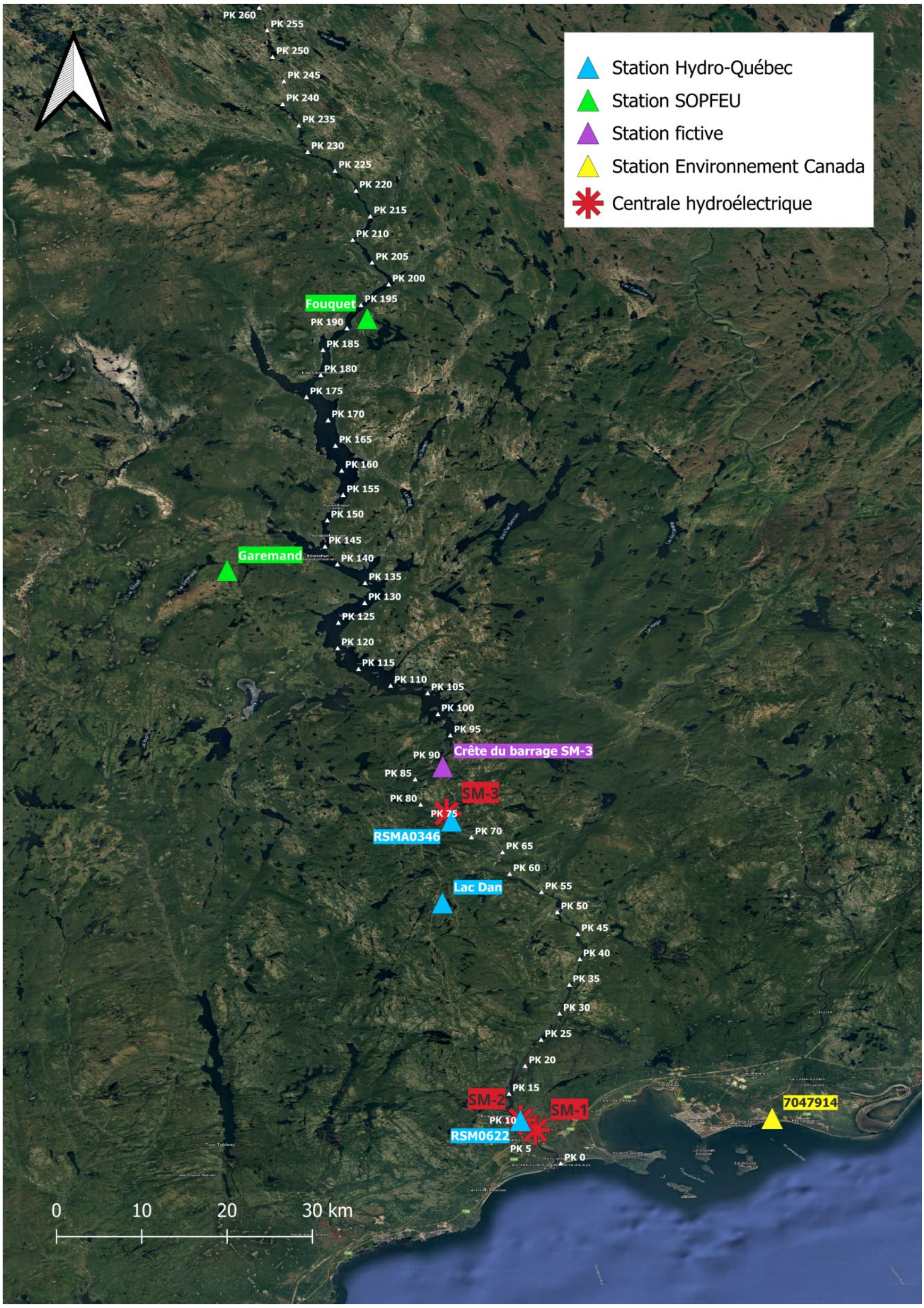


Figure 3.1 Stations de température d'air et d'eau utilisées à des fins d'analyse

3.3 Suivis des glaces effectués par Hydro-Québec

Hydro-Québec a effectué une campagne de terrain pour le suivi des glaces dans la zone d'étude avant la mise en place du second groupe turbine-alternateur, soit entre 2002 et 2005. Un suivi a également été réalisé pour les hivers 2023-2024 et 2024-2025 dans le cadre de l'étude d'avant-projet en cours.

Des survols héliportés ont eu lieu durant toutes ces années pour caractériser l'emprise de la couverture de glace et identifier les caractéristiques de la surface de glace telles que des fissures, des petites éclaircies, du frasil à la dérive ou la présence de glace morcelée.

Des mesures de température de l'eau et d'épaisseurs de glace ont été réalisées à différentes campagnes. Ceci a été fait entre les PK 10 et 92 pour le suivi de 2002-2005 et entre les PK 10 et 30 pour celui de 2024-2025. Des épaisseurs de glace ont également été mesurées dans le lac Hingan qui sert de zone témoin pour les deux périodes.

Les épaisseurs de glace de la zone 6 (partie aval du réservoir de SM-2) et de la zone témoin, qui ont toutes deux été sondées durant les campagnes de 2002-2005 et 2024-2025, sont comparées entre les suivis afin d'analyser l'effet du changement de l'hydraulicité ainsi que des conditions météorologiques et thermiques sur le couvert de glace. Notons que ce sont les valeurs moyennes mensuelles qui sont comparées entre elles afin de comparer des couverts de glace au même stade de croissance entre les périodes.

3.4 Analyse du régime des glaces actuel

3.4.1 Emprise de la couverture de glace

Le couvert de glace dans la zone d'étude peut être observé et caractérisé à l'aide d'images satellitaires. La plateforme Sentinel Hub a été utilisée pour collecter des images de moyenne résolution, publiées à intervalles variables (Sinergise Solutions d.o.o., 2025). Le site de NASA Worldview a servi à collecter des images de basse résolution, publiées sur une base quotidienne (NASA, 2025). Afin de collecter les images satellitaires, la zone d'étude a été divisée en sept sections (regroupant ensemble les zones 7.1 et 7.2) tel que décrit dans la section 2.3. Ces découpages ont été présentés à la Figure 2.1. Les images ont été collectées entre les mois d'octobre 2002 et mai 2025.

Les images de 2004 à 2025 ont servi à définir la dynamique du couvert de glace fixe et son emprise pour les 21 derniers hivers. Les images de 2002 à 2005 ont servi à calibrer certains paramètres de calcul des épaisseurs de glace.

À l'aide des images satellitaires, on cherche à déterminer les secteurs entièrement couverts de glace ainsi que les dates de prise et de départ de la couverture de glace. Il est possible d'observer la prise ou le départ des glaces sur une image où le couvert est partiel et sans couverture de neige.

Si ce moment n'est pas capturé par les images satellitaires, alors une moyenne peut être faite entre la dernière image en eau libre et la première image avec un couvert complet pour déterminer une date de prise et inversement pour le départ, pourvu que ces images aient un intervalle de moins de 12 jours entre elles. Cet intervalle a un impact sur le niveau de précision temporelle des dates de prise et de départ des glaces qui dépend de la qualité et de la quantité d'images satellitaires disponibles.

Lorsqu'il n'est pas possible d'identifier précisément le moment de la prise ou du départ en raison d'un intervalle de temps trop grand entre les images, la donnée est laissée vide. Ainsi, l'absence d'une donnée ne signifie pas nécessairement qu'il n'y a pas eu de couvert de glace pour cette année, pour l'ensemble des figures associées. De plus, une note est ajoutée sur les figures pour les années où le couvert ne s'est pas fermé complètement ou pendant une longue période afin de distinguer ces années de celles où la donnée est laissée vide par manque d'information.

Notons que les degrés-jours de gel à la prise et au départ des glaces sont analysés car les échanges thermiques entre la surface de l'eau et l'air sont le moteur principal de la formation de la glace. Il est donc possible de classer les différents types de régimes de glace en fonction du nombre de degrés-jour de gel à la prise. Par exemple, un milieu lacustre peu profond connait typiquement une prise des glaces à une cinquantaine de degrés-jours de gel, un régime fluvial en milieu naturel et non influencé connait une prise entre 150 et 200 degrés-jours de gel, et un milieu côtier connait une prise des glaces à plusieurs centaines de degrés-jours de gel.

Quant au départ des glaces, il peut avoir lieu avant la fin de l'hiver glaciologique alors qu'il y a encore accumulation de degrés-jours de gel (températures négatives) ou après la fin de l'hiver glaciologique alors que les degrés-jours de dégel (températures positives) ont commencé à se cumuler.

Notons que l'emprise du couvert de glace est également utilisée pour déterminer la position du bord frontal de la couverture de glace dans le tronçon entre la sortie de la centrale de SM-3 et la sortie du réservoir de SM-2. On s'intéresse en particulier à la position de l'interface entre le tronçon en eau libre et le couvert de glace partiel (avec des ouvertures) ainsi qu'à la position de l'interface entre le couvert de glace partiel et le couvert de glace complet (de rive en rive). Le déplacement de ces deux interfaces en cours d'hiver est un paramètre important de la dynamique des glaces dans le réservoir de SM-2 et dans le tronçon fluvial en amont. Les données des suivis de glace sont également utilisées pour compléter l'information compilée à partir des images satellitaires.

3.4.2 Épaisseurs de glace

Afin d'estimer l'épaisseur du couvert de glace, l'équation 1 traduisant la loi de Stefan peut être utilisée.

$$h = B\sqrt{G} \quad (1)$$

où h est l'épaisseur de glace en centimètres, G est le nombre de degrés-jours de gel effectifs, c'est-à-dire entre la prise des glaces et la fin de l'hiver glaciologique pour un départ après la fin de l'hiver glaciologique ou entre la prise et le départ des glaces pour un départ avant la fin de l'hiver glaciologique, et B est un coefficient expérimental en lien avec le site. Les valeurs typiques que peut prendre B sont les suivantes :

- B = 2,7 pour les lacs sans neige;
- B = 1,7-2,4 pour les lacs avec couvert de neige;
- B = 1,4-1,7 pour les rivières avec couvert de neige;
- B = 0,7-1,4 pour les petites rivières avec un écoulement rapide.

Le coefficient B a été calculé à l'aide des mesures d'épaisseur de glace collectées sur la rivière Sainte-Marguerite entre les PK 10 et 92 de 2002 à 2005 en utilisant la loi de Stefan, et ce de manière indépendante pour chaque zone dans laquelle des données étaient disponibles. Dans les zones d'analyse où aucune mesure d'épaisseur de glace n'a été réalisée (zones 1, 7.1 et 7.2), le coefficient B de la zone ayant la dynamique glaciologique la plus similaire a été utilisé.

Ce même exercice a été réalisé avec les épaisseurs de glace mesurées en 2025 afin de valider les valeurs de coefficients B utilisées pour les phases précédentes du projet. Toutefois, seule la zone 6 a fait l'objet de mesures d'épaisseurs de glace pour cette année. Ces résultats ont donc été extrapolés aux autres zones en fonction de la dynamique des glaces observée dans chacune.

Il est à noter que les épaisseurs de glace inférieures à 10 cm n'ont pas été utilisées pour estimer le coefficient B, car la loi de Stefan sert à modéliser la progression d'épaisseurs de glace sur une période de plusieurs jours en utilisant des températures moyennes journalières conduisant à des épaisseurs plus élevées que 10 cm. De plus, aucun coefficient B n'est attribué à la zone 3 puisque celle-ci ne forme un couvert de glace que très rarement et pour de courtes périodes seulement.

3.4.3 Accès au couvert de glace

Deux critères peuvent servir à évaluer l'accessibilité au couvert. L'état de la glace à franchir le long des rives influence l'accès au couvert car la présence de « slush », de fissures ou de murs de glace en bordure de rives peut empêcher les utilisateurs de rejoindre la partie centrale du couvert. L'épaisseur moyenne du couvert étudie la capacité du couvert à porter les charges de manière sécuritaire. Celle-ci est calculée en fonction des températures de l'air et de la dynamique glaciologique au site d'étude. Notons que seul le critère de l'épaisseur est abordé dans cette section et les conditions le long des rives sont détaillées dans la section suivante.

Pour que la glace ait une capacité portante sécuritaire, une épaisseur effective minimale de 20 cm est requise. Toutefois, lorsque la composition exacte de la glace n'est pas connue, il est conservateur de supposer que le couvert est constitué à 50 % de glace blanche et à 50 % de glace noire, la glace blanche ayant une capacité portante équivalente à la moitié de celle de la glace noire. L'hypothèse est donc que le couvert est composé de 14 cm de glace blanche et de 13 cm de glace noire pour une épaisseur totale de 27 cm, ce qui offre une capacité portante équivalente de glace noire ou épaisseur effective de 20 cm.

Afin de valider qu'une épaisseur de 27 cm a été atteinte, les degrés-jours de gel cumulés sont utilisés, et ce, de manière indépendante pour chaque zone puisque chacune possède une dynamique glaciologique distincte. Dans certaines zones, un couvert ne se forme presque jamais ou est très intermittent, soit sur les tronçons en aval des centrales SM-3 (zone 3), SM-2 (zone 7.1) et SM-1 (zone 7.2), et ces zones ne sont donc pas analysées quant à l'accès potentiel au couvert.

3.4.4 Conditions de glace le long des berges

La variation du niveau d'un plan d'eau en hiver, ou marnage hivernal, cause la formation de fissures le long des rives dans le couvert de glace. D'après notre référence sur la stabilité des couverts de glace soumis aux fluctuations de débit (Groupe Conseil LaSalle, 2000), la fissuration le long des rives peut avoir lieu pour un couvert de glace avec une épaisseur de 0,2 à 0,8 m lorsque le rehaussement du niveau d'eau est entre 0,24 et 0,29 m ou lorsque l'abaissement du niveau d'eau est entre 0,05 et 0,10 m.

Pour le réservoir de SM-2, les séries de débit à la centrale SM-3 pour les 20 dernières années sont étudiées. Les démarrages à pleine capacité de la centrale SM-3, soit de l'arrêt (0 m^3/s) à un turbinage à deux groupes (300 m^3/s), se déroulent sur une période minimale de deux heures. Ce sont ces événements où le débit augmente très rapidement qui génèrent les plus grandes variations de niveau dans le réservoir de SM-2 en aval à cause de la propagation de la vague de démarrage de SM-3 à SM-2. Ainsi, les variations de niveau d'eau suivant ces démarrages rapides sont documentées puis extrapolées pour un régime à trois groupes (500 m^3/s) afin d'évaluer l'impact de l'augmentation de la capacité à SM-3 sur le réservoir de SM-2.

Une fissuration à répétition due à un marnage significatif et continu risque de causer le morcèlement du couvert de glace sur une bande riveraine plus ou moins large et parallèle à la rive. C'est le cas pour le réservoir de SM-3 qui connait un abaissement de plusieurs mètres en cours d'hiver. Un exemple de fissure due au marnage dans le réservoir de SM-3 est montré à la Figure 3.2, sur l'image satellitaire du 13 mai 2019 capturée après la fonte de la majorité du couvert de neige. Notons que ce type de fissure due au marnage n'est pas à confondre avec les fissures traversant le couvert de part et d'autre qui elles sont dues aux variations thermiques.



Figure 3.2 Fissure le long de la rive sur une image satellitaire dans la zone 1 (13 mai 2019)

Pour le marnage important dans le réservoir de SM-3, la méthodologie utilisée est celle décrite dans le guide de Carter. Une première fissure sépare la plaque de glace flottante de la partie du couvert accrochée à la berge d'une distance de 1 à 2 m. Les deuxième et troisième fissures se forment à une distance L de la fissure voisine qui peut être calculée à l'aide de l'équation 2 avec l'épaisseur de glace moyenne dans le réservoir en fin d'hiver (Carter Consultants, 2003).

$$L = 8{,}8\, h^{3/4} \qquad (2)$$

où h est l'épaisseur de glace au moment de la formation des fissures.

Ceci forme une bande riveraine de glace morcelée composée de trois morceaux, soit le morceau du couvert rattaché à la berge et de deux morceaux flottant sur le plan d'eau. Ces distances identiques (L) entre les fissures 1 et 2 puis entre les fissures 2 et 3 peuvent être additionnées à la distance de 2 m séparant la fissure 1 de la rive afin d'obtenir la longueur d'une bande riveraine de glace morcelée en fin d'hiver ainsi que sa position. La Figure 3.3 montre la dynamique de formation de ces trois fissures et la bande riveraine de glace morcelée résultante.

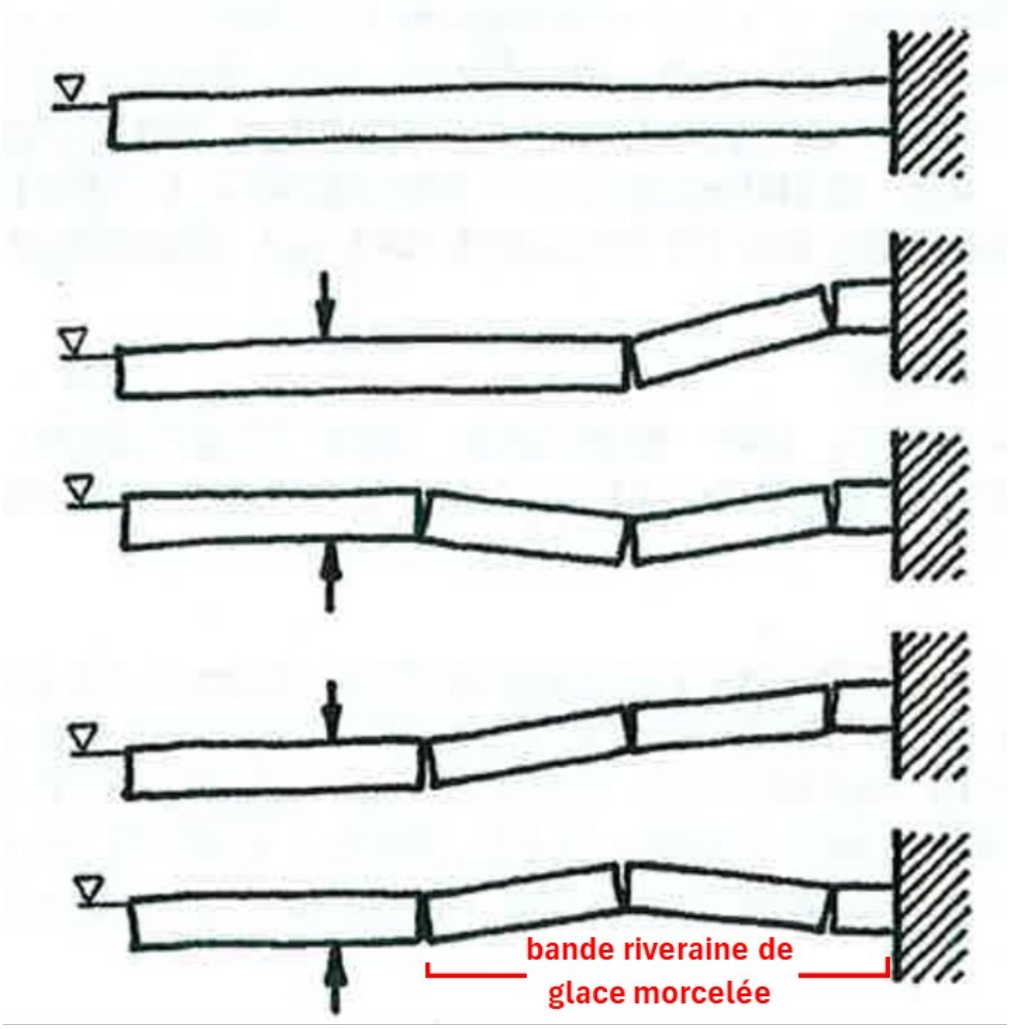


Figure 3.3 Formation des fissures sur le pourtour d'un réservoir par flexion lors du marnage

Comme le niveau d'eau s'abaisse durant l'hiver dans le réservoir de SM-3 (voir Figure 5.7), la position de la berge (l'intersection entre le plan d'eau et la terre ferme) est déplacée vers l'intérieur du réservoir. Dans ce cas, la première bande riveraine de glace morcelée est déposée sur la berge tandis que de nouvelles fissures se forment et morcèlent ainsi une nouvelle bande riveraine. À la fin de l'hiver, le morcèlement du couvert de glace en une succession de bandes a progressé vers le centre du réservoir d'une distance qui dépend de l'importance du marnage et de la pente de la berge, tel qu'illustré à la Figure 3.4.

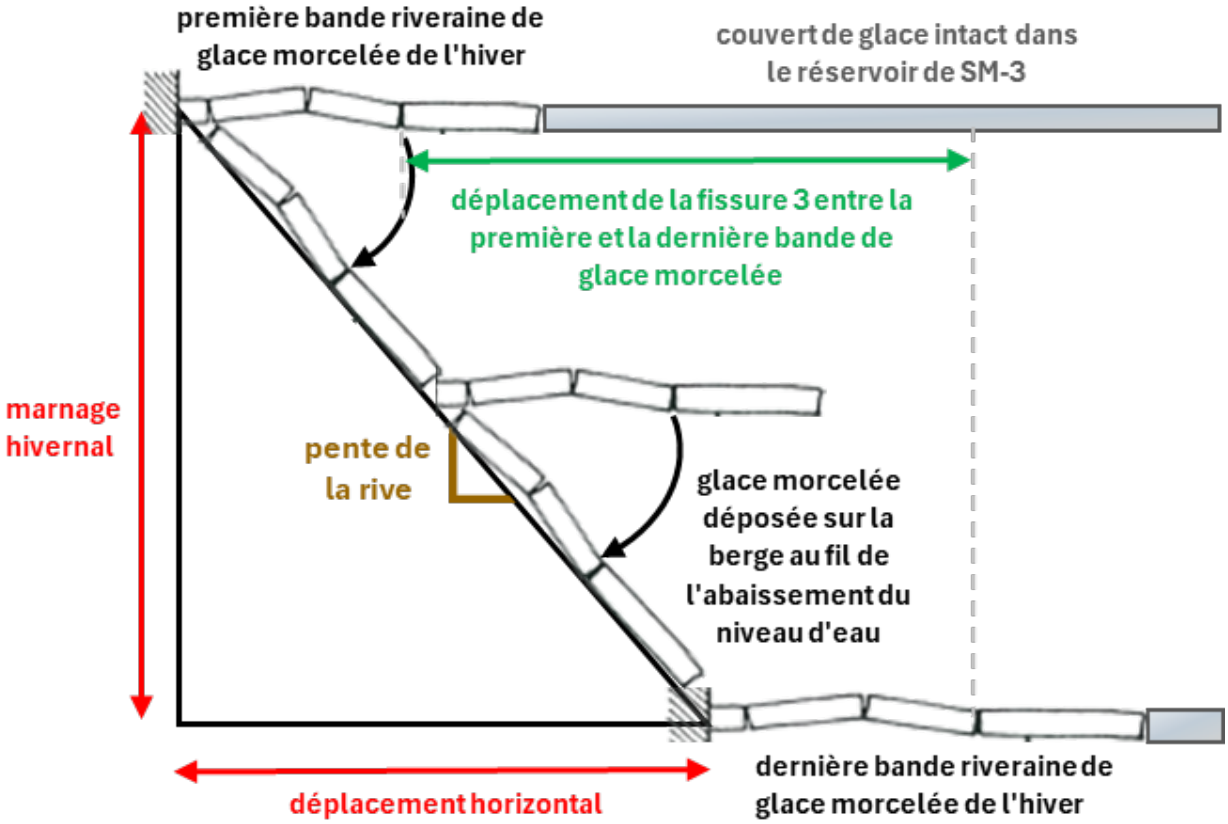


Figure 3.4 Effet du marnage hivernal sur le déplacement de la fissure 3 dans le réservoir de SM-3

La distance totale de glace morcelée est ce que l'on recherche à caractériser, car la présence d'un champ de glace morcelé sur une distance plus ou moins élevée pourrait nuire à l'accès au réservoir. Toutefois, il n'existe pas de critère ferme pour statuer sur une distance précise de glace morcelée en berge pouvant avoir un impact sur l'accès au couvert. Il s'agit donc d'évaluer de manière qualitative les entraves potentielles à l'accès au réservoir en période hivernale.

La pente des berges du réservoir de SM-3 entre les PK 90 et 135 est caractérisée à l'aide de sections en travers tracées à tous les 2,5 km, comme montré à la Figure 3.5. Ces profils ont été examinés jusqu'à l'élévation de 407 m, soit le niveau d'eau maximal atteint dans le réservoir durant la période 2004-2025. Les pentes utilisées pour l'analyse du marnage sont présentées au Tableau 3.1. Celles-ci varient de 0,21 à 1,02 m/m avec une médiane de 0,47 m/m pour la rive droite et de 0,15 à 0,82 m/m avec une médiane de 0,32 m/m pour la rive gauche.

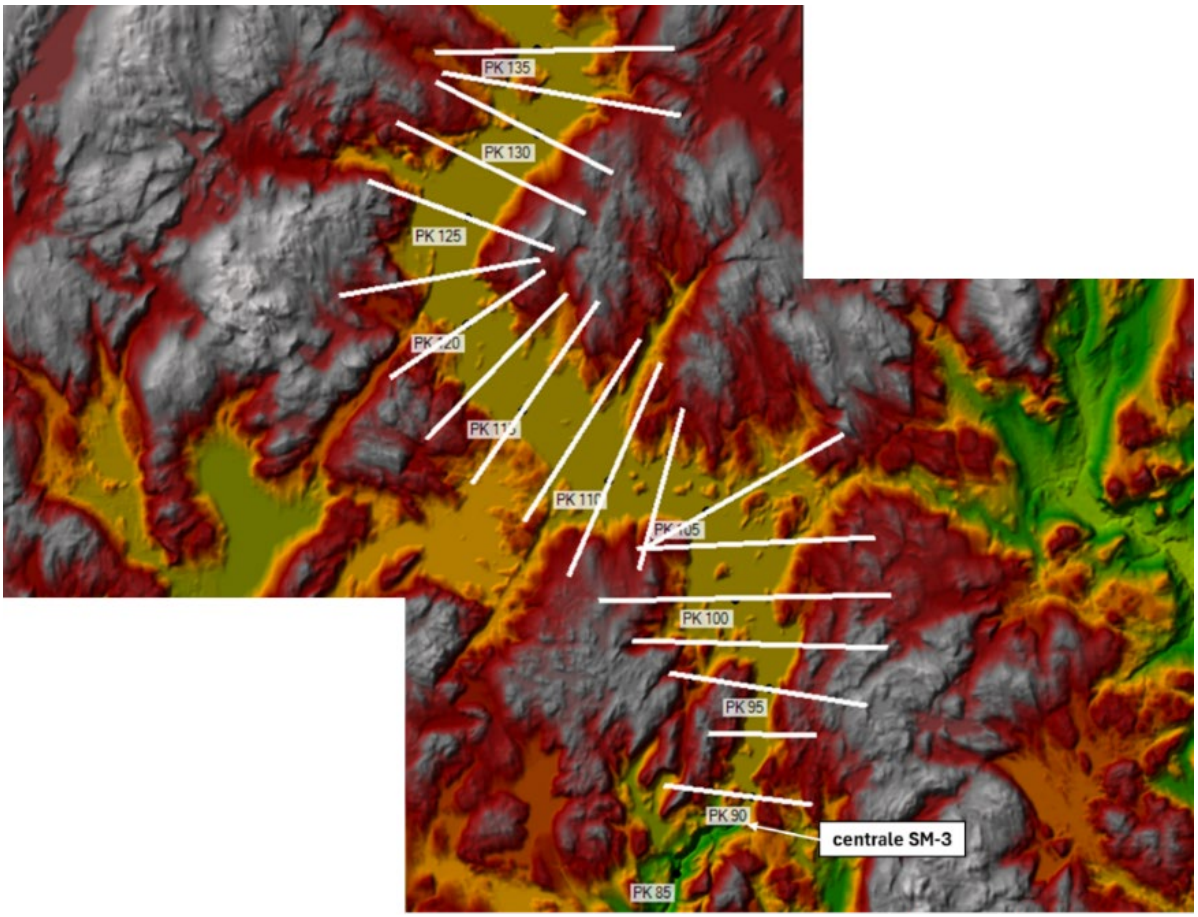


Figure 3.5 Sections transversales tracées à chaque 2,5 km dans le réservoir de SM-3 (PK 135-90) pour évaluer la pente des rives

Tableau 3.1 Pentes des rives utilisées dans l'analyse du marnage hivernal du réservoir de SM-3

Statistique	Pente rive droite	Pente rive gauche
Pente minimale	0,21 m/m	0,15 m/m
Pente médiane	0,47 m/m	0,32 m/m
Pente maximale	1,02 m/m	0,82 m/m

Le marnage hivernal historique moyen dans le réservoir de SM-3 est de 5,6 m. Afin d'effectuer une analyse de sensibilité du morcèlement du couvert de glace en rive à une variation de ce marnage, un abaissement hivernal du niveau d'eau augmenté de 4 m a été étudié. Les effets de cette variation de 5,6 m à 9,6 m sur l'emprise du champ de glace morcelé en rive sont examinés à la section 8.2 pour évaluer l'impact sur la traversée du couvert de glace.

4 CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES ET THERMIQUES

4.1 Températures de l'air et hivers glaciologiques

Pour la zone en amont de SM-3 (PK 135 à 85), la Figure 4.1 montre les températures de l'air moyennes journalières et l'évolution des degrés-jours de gel pour les hivers entre 2004 et 2025. Pour la zone en aval de SM-3 (PK 76,5 à 0), la Figure 4.2 montre les températures de l'air moyennes journalières et l'évolution des degrés-jours de gel pour les hivers entre 2004 et 2025. La Figure 4.3 et la Figure 4.4 montrent respectivement la rigueur et la durée des hivers glaciologiques pour la même période, et ce, en amont comme en aval de SM-3. Le Tableau 4.1 sert à comparer les caractéristiques d'un hiver glaciologique moyen entre l'amont et l'aval de la centrale SM-3.

En amont de la centrale SM-3, l'hiver glaciologique moyen a lieu entre le 4 novembre et le 13 avril. Il est d'une durée de 163 jours, cette valeur variant entre 138 et 199 jours pour la période étudiée. La température moyenne durant l'hiver glaciologique est de -9,23 °C. La rigueur moyenne pour la période 2004-2025 est de 1 523 degrés-jours de gel avec un écart-type de 292 degrés-jours de gel. Les extrêmes de la période étudiée ont eu lieu à l'hiver 2009-2010 possédant une rigueur de 889 degrés-jours de gel et à l'hiver 2014-2015 possédant une rigueur de 2 038 degrés-jours de gel.

En aval de la centrale SM-3, l'hiver glaciologique moyen a lieu entre le 10 novembre et le 9 avril. Il est d'une durée de 154 jours, cette valeur variant entre 133 et 174 jours pour la période étudiée. La température moyenne durant l'hiver glaciologique est de -8,84 °C. La rigueur moyenne pour la période 2004-2025 est de 1 366 degrés-jours de gel avec un écart-type de 289 degrés-jours de gel. Les extrêmes de la période étudiée ont eu lieu à l'hiver 2009-2010 possédant une rigueur de 693 degrés-jours de gel et à l'hiver 2013-2014 possédant une rigueur de 1 839 degrés-jours de gel.

Ainsi, l'hiver glaciologique moyen débute 6 jours plus tôt et se termine 4 jours plus tard en amont de la centrale SM-3 qu'en aval. La température moyenne durant l'hiver glaciologique est 0,39 °C plus froide en amont qu'en aval de la centrale SM-3 et la rigueur y est plus importante de 157 degrés-jours de gel.

Afin d'effectuer le suivi du couvert de glace, des survols héliportés ont eu lieu dans la zone d'étude durant les hivers entre 2002 et 2005 et entre 2023 et 2025.

L'hiver 2002-2003 possède une rigueur de 1 881 degrés-jours de gel en amont de la centrale SM-3 et de 1 763 degrés-jours de gel en aval, il s'agit donc d'un hiver rigoureux. Les rigueurs sont de 1 482 degrés-jours de gel en amont et de 1 358 degrés-jours de gel en aval de la centrale SM-3 pour l'hiver 2003-2004, soit un hiver moyen. L'hiver 2004-2005 connait un indice de gel de 1 696 degrés-jours de gel en amont et de 1 545 degrés-jours de gel en aval de la centrale SM-3, soit un hiver moyen également.

L'hiver 2023-2024 correspond au troisième hiver le plus clément des 21 dernières années, en amont comme en aval de la centrale SM-3. Dans la partie amont de la zone d'étude (PK 135 à 85), la rigueur de cet hiver est de 1 161 degrés-jours de gel. Il couvre la période du 29 octobre au 28 mars pour une durée de 153 jours. À l'aval de la centrale SM-3, la rigueur de cet hiver est de 981 degrés-jours de gel. Il couvre la période du 29 octobre au 27 mars pour une durée de 152 jours.

L'hiver 2024-2025 correspond au quatrième hiver le plus clément des 21 dernières années en amont de la centrale SM-3 et au cinquième hiver le plus clément en aval. Dans la partie amont de la zone d'étude (PK 135 à 85), la rigueur de cet hiver est de 1 262 degrés-jours de gel. Il couvre la période du 28 novembre au 12 avril pour une durée de 138 jours. À l'aval de la centrale SM-3, la rigueur de cet hiver est de 1 157 degrés-jours de gel. Il couvre la période du 27 novembre au 12 avril pour une durée de 139 jours.

Les rigueurs de récurrence 2, 10, 20, 50 et 100 ans ont été calculées à l'aide d'une distribution normale utilisée sur les 21 années de données les plus récentes. Chacune inclut un intervalle de confiance pour l'enveloppe supérieure. Le Tableau 4.2 montre la rigueur des hivers pour l'ensemble de la zone d'étude pour différentes récurrences. La rigueur de récurrence 100 ans est de 2 339 degrés-jours de gel en amont de la centrale SM-3 et de 2 172 degrés-jours de gel en aval.

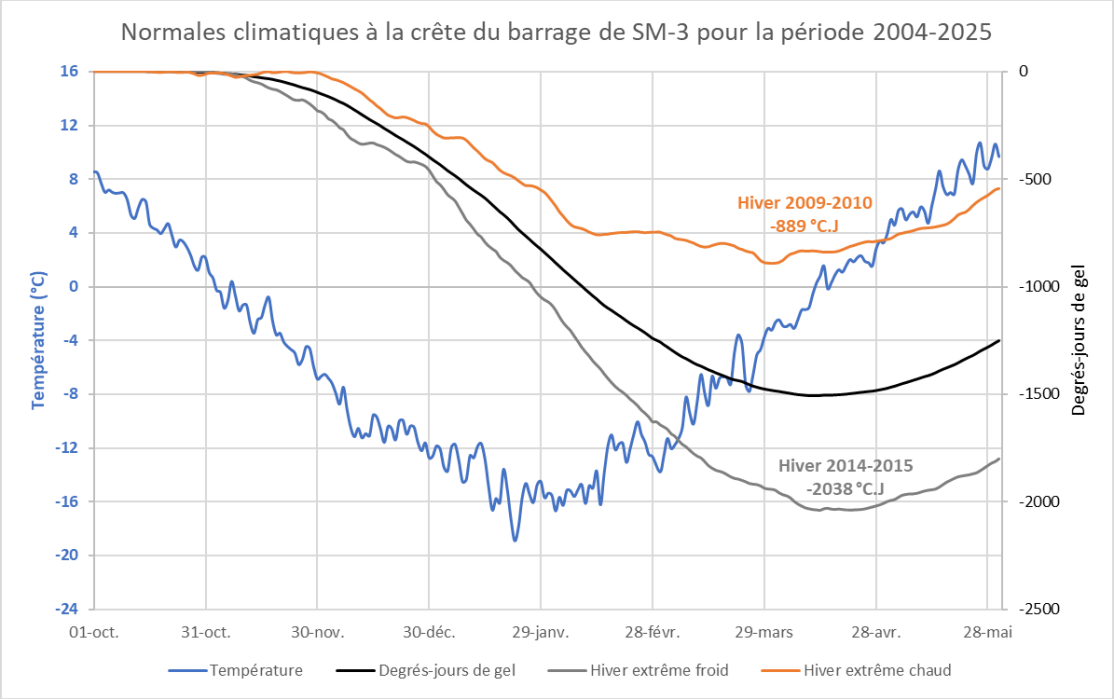


Figure 4.1 Température de l'air moyenne journalière et degrés-jours de gel pour 2004-2025 – Amont de la centrale SM-3

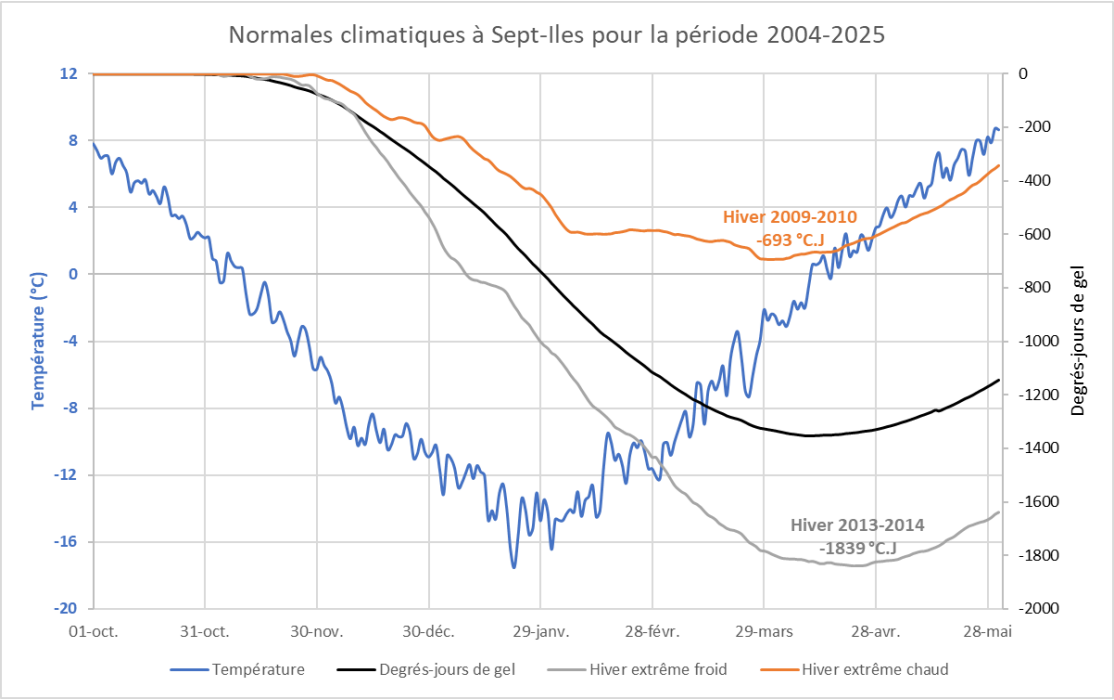


Figure 4.2 Température de l'air moyenne journalière et degrés-jours de gel pour 2004-2025 – Aval de la centrale SM-3

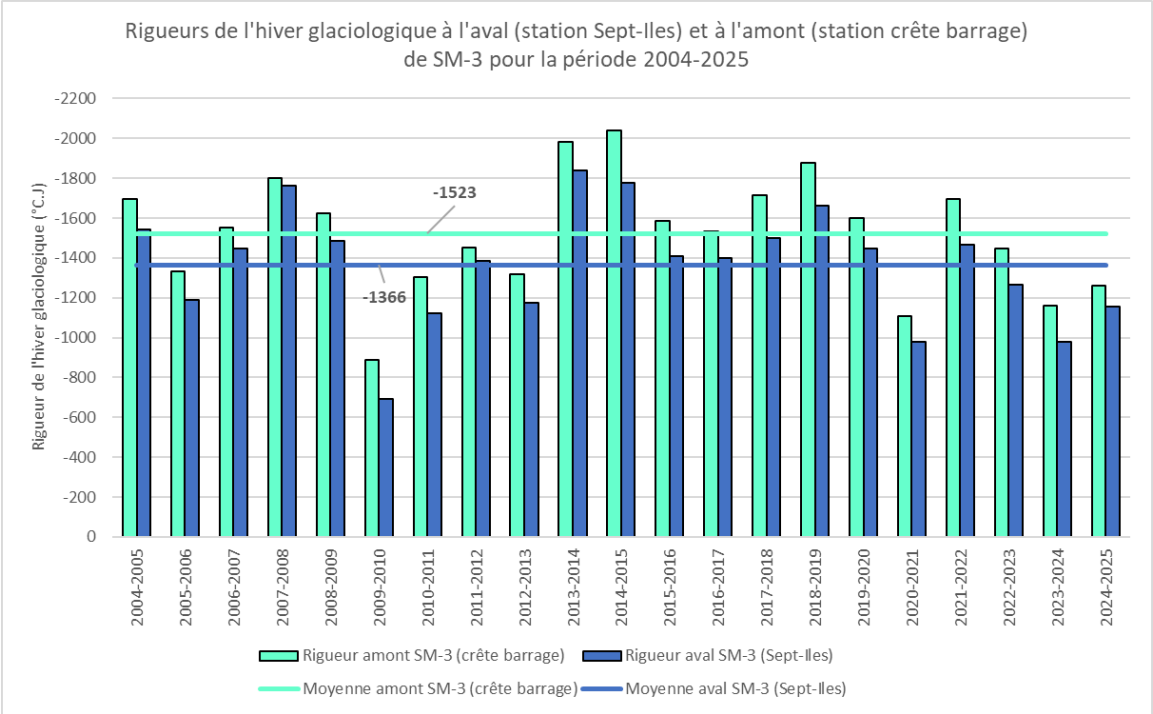


Figure 4.3 Rigueur des hivers pour 2004-2025 – Amont et aval de la centrale SM-3

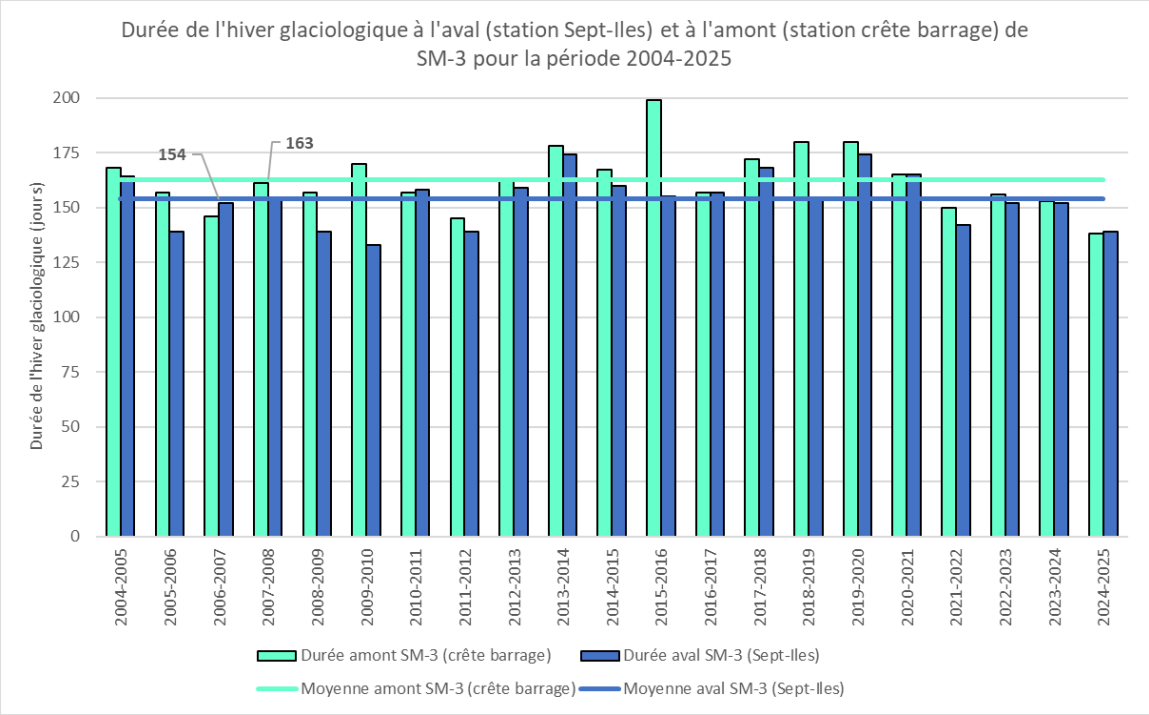


Figure 4.4 Durée des hivers glaciologiques pour 2004-2025 – Amont et aval de la centrale SM-3

Tableau 4.1 Comparaison des hivers glaciologiques moyens – Amont et aval de la centrale SM-3

Hiver glaciologique moyen	Amont SM-3	Aval SM-3
Début	04 nov.	10 nov.
Fin	13 avril	09 avril
Durée	163 jours	154 jours
Température moyenne	-9,23 °C	-8,84 °C
Rigueur	-1 523 °C.J	-1 366 °C.J

Tableau 4.2 Rigueur des hivers pour différentes récurrences – Amont et aval de la centrale SM-3

Récurrence	Rigueur – Amont SM-3	Rigueur – Aval SM-3
2 ans	-1 577 °C.J	-1 419 °C.J
10 ans	-1 986 °C.J	-1 824 °C.J
20 ans	-2 108 °C.J	-1 944 °C.J
50 ans	-2 247 °C.J	-2 081 °C.J
100 ans	-2 339 °C.J	-2 172 °C.J

4.2 Températures de l'eau

4.2.1 Températures de l'eau aux centrales SM-3 et SM-2

La Figure 4.5 et la Figure 4.6 montrent les températures de l'eau respectivement à l'aval des aménagements SM-3 et SM-2 pour l'ensemble des hivers dont les données ont été transmises par Hydro-Québec.

Les températures de l'eau à l'aval des centrales SM-3 et SM-2 sont respectivement tirées des stations RSMA0346 et RSM0622 d'Hydro-Québec. La station RSMA0346 est située au PK 75, soit environ 1,5 km à l'aval du canal de fuite de SM-3, et reçoit l'eau sortant de la centrale SM-3 ainsi que d'une partie du bassin versant intermédiaire en amont du réservoir de SM-2. La contribution du bassin versant intermédiaire au débit transitant par le PK 75 est généralement faible, à l'exception des moments où la centrale SM-3 est à l'arrêt et où ce sont alors les apports hydrologiques naturels qui dictent la température de l'eau au PK 75. Des températures de l'eau y sont disponibles entre 2006 et 2012 et pour l'hiver 2024-2025, elles couvrent ainsi sept hivers. Il est à noter que des données à SM-3 sont manquantes pour de longues périodes durant les hivers 2008-2009 et 2010-2011. La station RSM0622 est située au PK 10, soit à l'aval de la centrale SM-2, et reçoit l'eau sortant du réservoir de SM-2. Des températures de l'eau à la centrale SM-2 sont disponibles entre 2003 et 2012, elles couvrent ainsi neuf hivers.

À l'automne, les températures de l'air en diminution refroidissent la surface de l'eau dans les réservoirs jusqu'à ce que l'eau atteigne une température de 4 °C, point où elle est à sa densité maximale. Cette eau lourde se dirige alors vers le fond et une eau plus chaude vient prendre sa place près de la surface. Ce brassage automnal se poursuit jusqu'à ce que toute la colonne d'eau soit à une température homogène de 4 °C, ce qui représente l'isothermie automnale. À partir de ce moment, lorsque l'eau à la surface se refroidit, sa densité s'abaisse à nouveau et elle devient moins lourde que le reste de la masse d'eau et reste en surface, elle peut ainsi atteindre le point de congélation. C'est à ce moment que se forme la couverture de glace des grands lacs et des réservoirs. Notons que ce processus est d'autant plus long que la section est profonde.

Aux deux centrales, la température de l'eau est en diminution au début du mois d'octobre et atteint graduellement un minimum moyen à la fin du mois de décembre. Elle connait un plateau jusqu'à la mi-avril à SM-2 avec une moyenne durant cette période de 0,8 °C et jusqu'à la fin avril au PK 75 avec une moyenne durant cette période de 2,1 °C. Elle remonte ensuite rapidement.

Au PK 75 (Figure 4.5), la température de l'eau varie beaucoup d'une année à l'autre entre le 1er octobre et le 30 novembre. Cette variabilité diminue graduellement au mois de décembre. Au cœur de l'hiver (1er février), la température de l'eau est en moyenne de 2,25 °C et est rarement en dessous de 2 °C. La température de l'eau et sa variabilité augmentent à nouveau à partir de la mi-avril, soit avec la fin de l'hiver glaciologique.

En comparant les dates de prise des glaces de la zone 2, située directement en amont de la centrale SM-3, avec les températures de l'eau au PK 75, il est possible de constater qu'une augmentation rapide de la température de l'eau a lieu tout juste après la prise des glaces pour 4 des 7 années analysées. Ainsi, il est difficile d'établir une tendance par rapport à ce phénomène au PK 75.

L'analyse conjointe des températures de l'eau et de la prise des glaces près de SM-3 permet de voir que plus le couvert se ferme tôt, plus l'eau en hiver est chaude et inversement pour 4 des 5 années où assez de données sont disponibles (manque de données pour 2008-2009 et 2010-2011). Ceci est dû aux propriétés isolantes du couvert de glace réduisant les échanges thermiques entre la surface de l'eau du réservoir et l'atmosphère. Toutefois, le nombre limité d'années étudiées ne permet pas de dire qu'une tendance définitive existe quant à ce phénomène à SM-3.

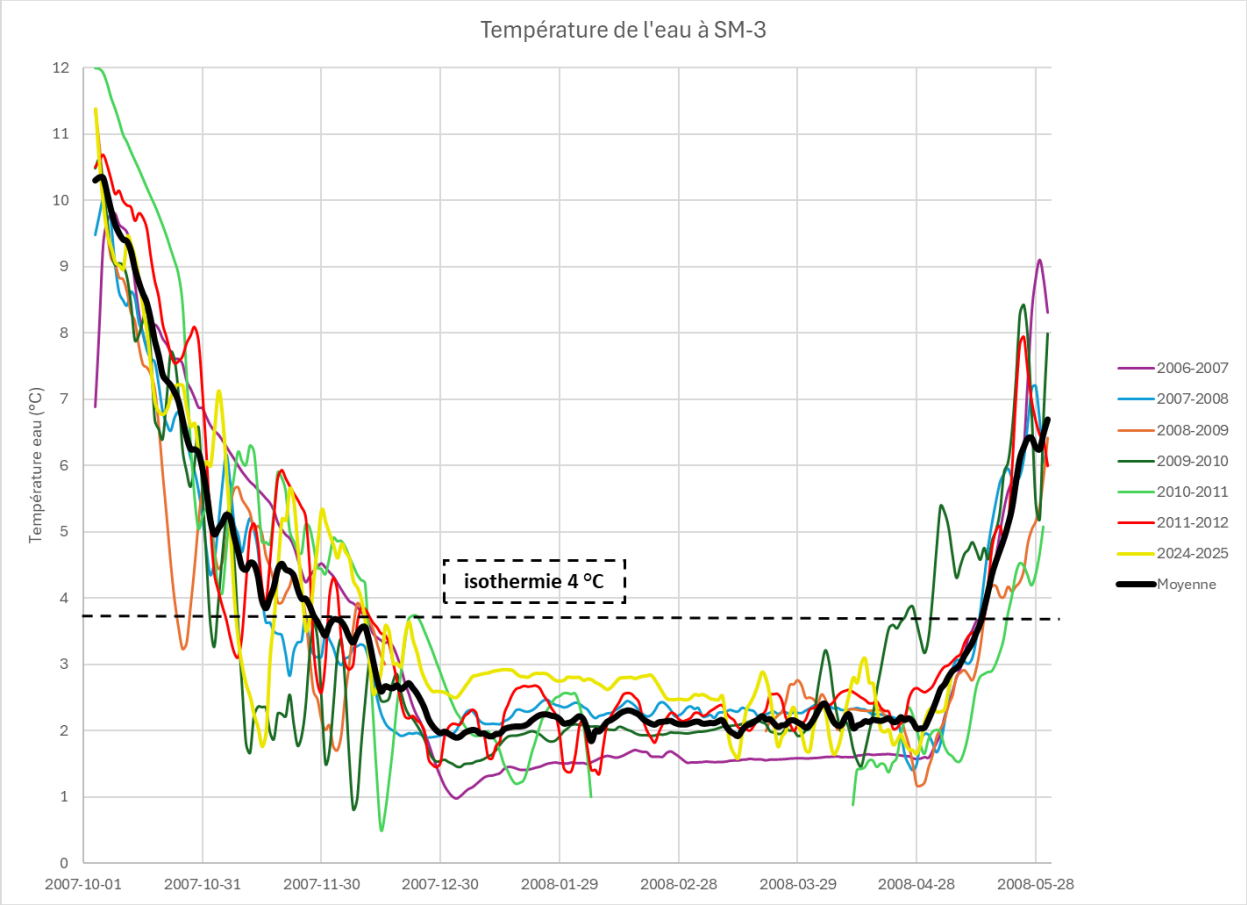


Figure 4.5 Température de l'eau pour 2006-2012 et 2024-2025 – PK 75

À la centrale SM-2 (Figure 4.6), la température de l'eau chute de 13 à 2 °C avec peu de variabilité entre le 1er octobre et le 30 novembre pour les hivers entre 2003 et 2012. Cette diminution ralentit

au cours du mois de décembre et la température s'approche de 1 °C au début janvier. Au cœur de l'hiver (1er février), la température de l'eau est en moyenne de 0,64 °C ±0,5 °C. La température de l'eau augmente à nouveau à partir du début avril, soit avec la fin de l'hiver glaciologique. La variabilité des températures printanières d'une année à l'autre augmente un peu par rapport au cœur de l'hiver, mais cette variabilité demeure beaucoup plus faible que ce qui est constaté à l'exutoire de la centrale SM-3 en raison du régime thermique distinct d'un réservoir à l'autre.

En comparant les dates de prise des glaces de la zone 6, située directement en amont de la centrale SM-2, avec les températures de l'eau à SM-2, il est possible d'observer qu'il y a généralement une hausse soudaine de la température de l'eau suivant tout juste la prise des glaces. Cette tendance est visible pour 8 des 9 années étudiées à SM-2. De plus, il a été observé que plus le couvert se ferme tôt, plus l'eau en hiver est chaude et inversement. Ceci est vérifié par 7 des 9 années étudiées. Les hivers 2004-2005 et 2005-2006 montrent toutefois une tendance inverse. Ces deux phénomènes s'expliquent par l'ajout d'une couche isolante sous forme du couvert de glace qui réduit les échanges thermiques entre la surface de l'eau du réservoir et l'atmosphère.

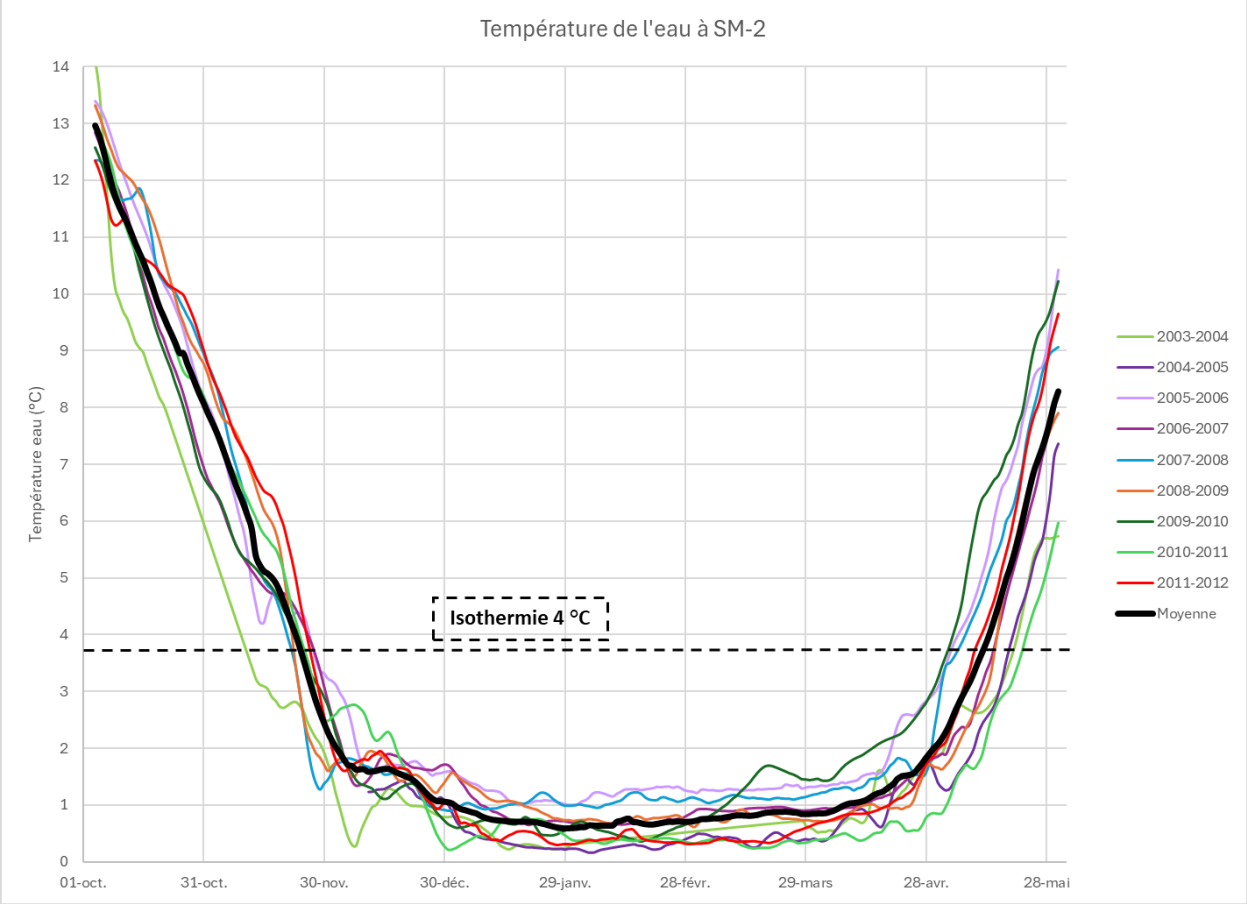


Figure 4.6 Température de l'eau pour 2003-2012 – Centrale SM-2

Notons qu'il est supposé que les températures de l'eau dans la zone d'étude demeurent inchangées entre la période actuelle et la période future après l'ajout d'un troisième groupe.

4.2.2 Profil thermique de la rivière Sainte-Marguerite

Des températures de l'eau ont été collectées lors de la campagne du suivi des glaces d'Hydro-Québec pour les PK 10 à 92 entre 2002 et 2005, et pour les PK 10,5 à 28,5 à l'hiver 2024-2025. Pour ce dernier hiver, notons que seules les températures collectées lors de la campagne 3 et l'une des séries collectées lors de la campagne 4 (point GPT2) sont utilisables en raison des écarts observés entre la température à la descente et à la remontée de la sonde pour de mêmes profondeurs. Ce sont tout de même des profils de la rivière qui sont présentés afin de faciliter la comparaison entre les données d'une année à l'autre.

L'eau de la rivière Sainte-Marguerite peut interagir avec le couvert de glace. Ainsi, des profils de température de l'eau près de la surface (profondeur 0,5 m) sont présentés entre la Figure 4.7 et la Figure 4.10. Ces profils couvrent les zones 2 à 6 conjointement afin d'offrir une vue globale du régime thermique de la rivière dans la zone d'étude. La rigueur de l'hiver aux deux stations météorologiques utilisées pour l'analyse est présentée sur chaque figure.

La température de l'eau diminue d'abord dans la partie aval du tronçon étudié, puis dans la partie amont plus tard durant l'hiver. Ainsi, la température de l'eau est généralement plus faible dans la partie aval de la rivière, soit entre les PK 10 et 50.

L'hiver 2002-2003 est le plus rigoureux des quatre hivers étudiés et le seul où des températures de l'eau autour du point de congélation ont été enregistrées, et ce, entre les PK 10 et 57. Il est donc possible de conclure qu'il faut un hiver particulièrement rigoureux pour atteindre l'isotherme 0 °C en aval du PK 57 au cœur de l'hiver.

Rappelons que l'érosion thermique est le processus physique selon lequel l'eau ayant une température au-dessus du point de congélation fait fondre la glace par convection. Pour des hivers moyens et cléments, les températures de l'eau positives tout au long de l'hiver favorisent l'érosion thermique du couvert de glace si les vitesses de l'écoulement sous le couvert sont modérées ou élevées (voir section 5.3). Le tronçon en amont du PK 50 est particulièrement affecté par ce phénomène puisqu'il reçoit l'eau sortant de SM-3. Durant la majorité de l'hiver, à l'exception du cœur de l'hiver pour un hiver très froid durant lequel l'eau peut être refroidie jusqu'au point de congélation sur le tronçon à surface libre en aval de SM-3, l'érosion thermique en présence de vitesses de l'écoulement élevées est accentuée sur l'ensemble des tronçons en aval de SM-3 car les températures de l'eau y sont positives pour tous les hivers.

Notons que pour un hiver clément, comme l'hiver 2024-2025, des températures de l'eau positives sont mesurées en surface dans la partie aval du réservoir de SM-2, ce qui indique la présence d'érosion thermique dans les chenaux du réservoir et dans l'ensemble du tronçon fluvial plus en amont.

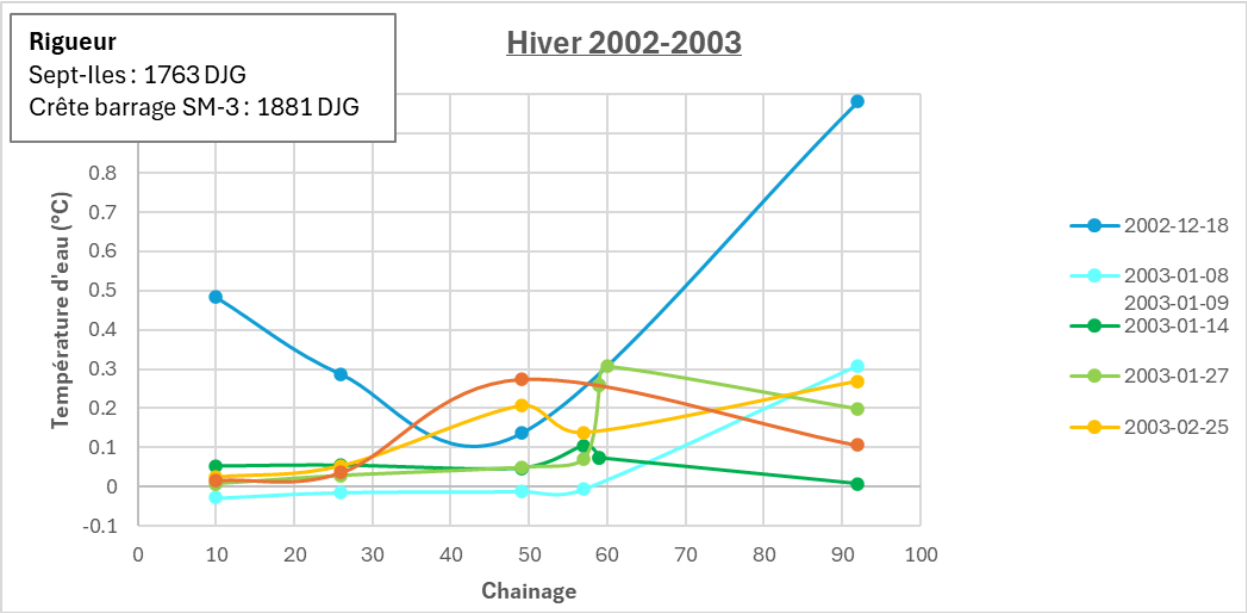


Figure 4.7 Profil des températures de l'eau (profondeur 0,5 m) et rigueur pour l'hiver 2002-2003

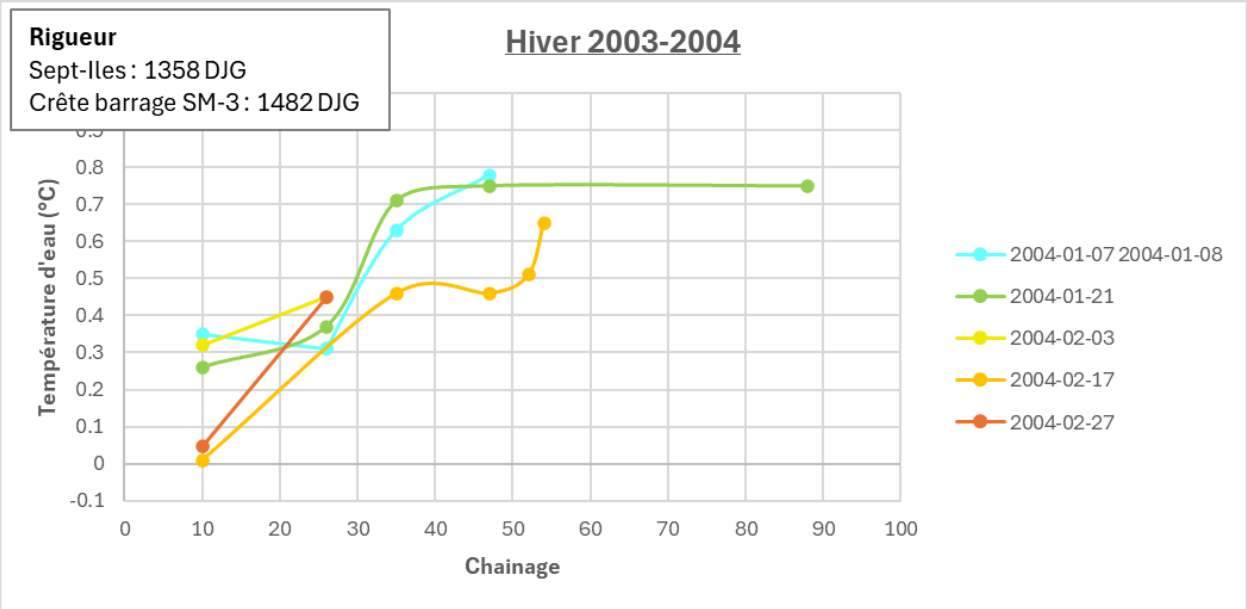


Figure 4.8 Profil des températures de l'eau (profondeur 0,5 m) et rigueur pour l'hiver 2003-2004

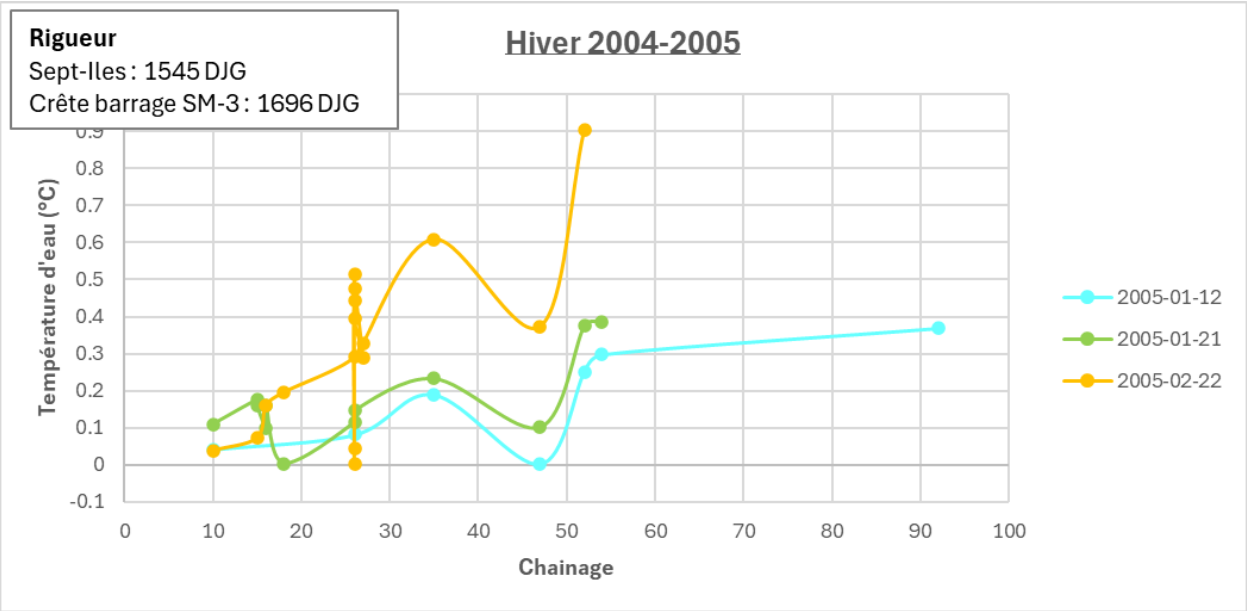


Figure 4.9 Profil des températures de l'eau (profondeur 0,5 m) et rigueur pour l'hiver 2004-2005

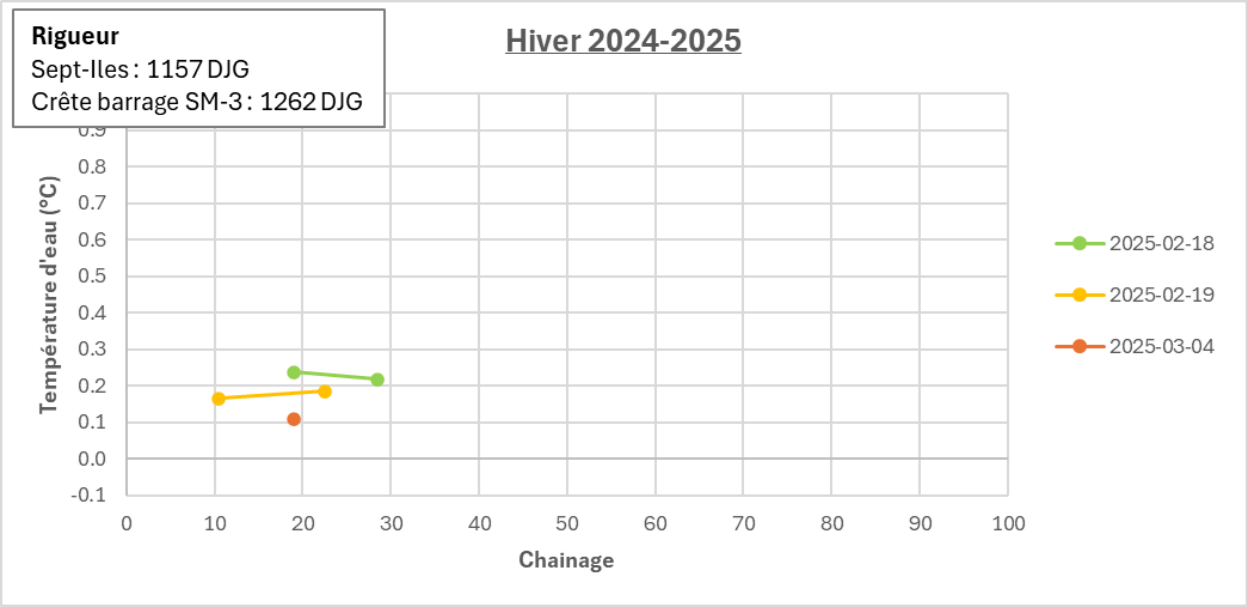


Figure 4.10 Profil des températures de l'eau (profondeur 0,5 m) et rigueur pour l'hiver 2024-2025

4.3 Comparaison des données thermiques

Les données de températures de l'air (représentées par les degrés-jours de gel) sont comparées aux données de température de l'eau aux centrales SM-2 et SM-3 afin de faire ressortir la manière dont l'évolution de la température de l'air affecte la température de l'eau dans la rivière. Cette comparaison est effectuée à la Figure 4.11 pour la centrale SM-3 et à la Figure 4.12 pour la centrale SM-2.

Cinq phases distinctes sont observables pour les données thermiques, à SM-3 comme à SM-2, et sont découpées par des traits pointillés sur chaque figure.

La première phase est le refroidissement automnal où les températures de l'eau sont toujours élevées alors que les températures de l'air sont sous le point de congélation et qu'il y a une baisse notable pour les deux courbes. Ceci a lieu jusqu'à la fin novembre à SM-3 comme à SM-2.

La seconde phase est le début de l'hiver où le refroidissement de la température de l'eau est lent, car l'évolution des degrés-jours de gel reste encore modeste en début d'hiver, soit jusqu'à la mi-janvier.

La troisième phase est le cœur de l'hiver où les températures de l'eau connaissent un plateau et les températures de l'air sont au minimum de la saison, ce qui est illustré par la croissance rapide des degrés-jours de gel. Ce plateau a lieu de la mi-janvier à la mi-février à des valeurs avoisinant 2 °C à SM-3 et 0,8 °C à SM-2. Notons que malgré des hivers plus rigoureux à SM-3, la température de l'eau s'y maintient à une valeur plus élevée qu'à SM-2.

La quatrième phase constitue l'essoufflement de l'hiver glaciologique durant lequel les températures de l'eau et de l'air commencent une remontée lente.

La cinquième phase débute près de la fin de l'hiver glaciologique alors que se produit une augmentation rapide des températures de l'eau. Ceci a lieu à la fin de l'hiver glaciologique à SM-3 et une semaine avant la fin de l'hiver à SM-2.

Bien que l'effet des températures de l'air sur les températures de l'eau soit visible aux deux centrales hydroélectriques, cette relation est beaucoup plus évidente à SM-2 qu'à SM-3 qui montre une variabilité beaucoup plus faible dans ses températures de l'eau.

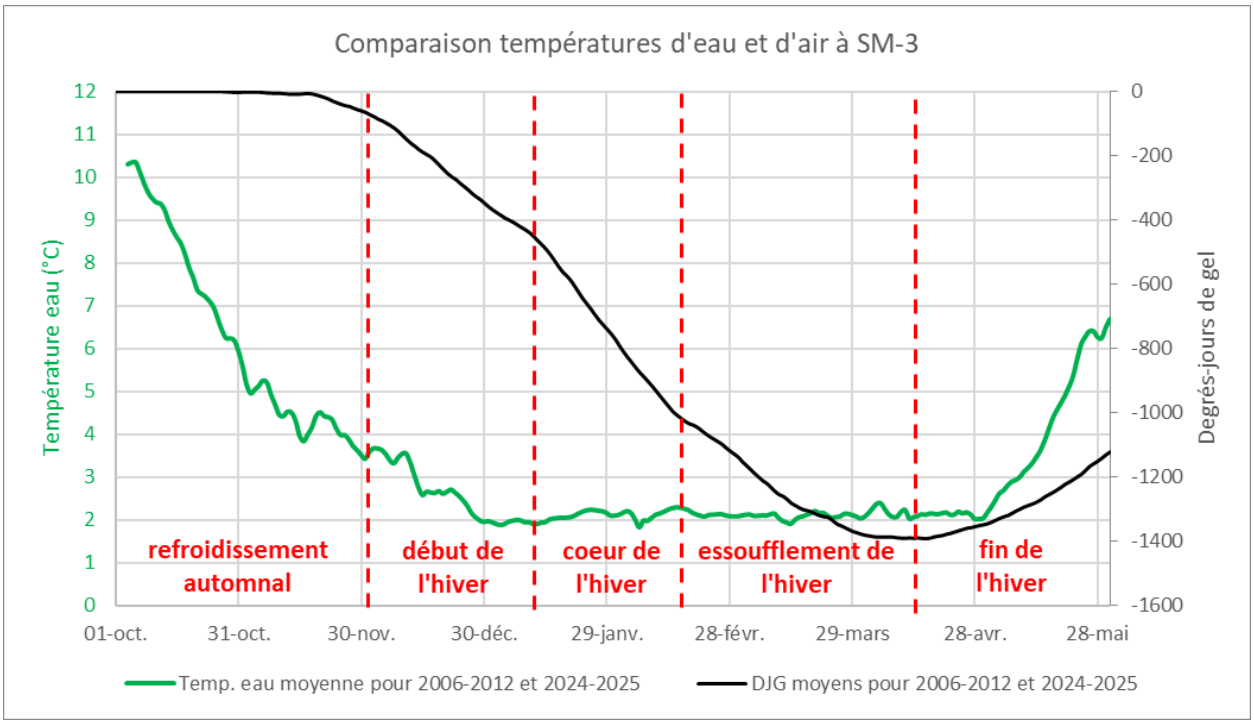


Figure 4.11 Comparaison des températures d'eau et d'air pour 2006-2012 et 2024-2025 à SM-3 (PK-75)

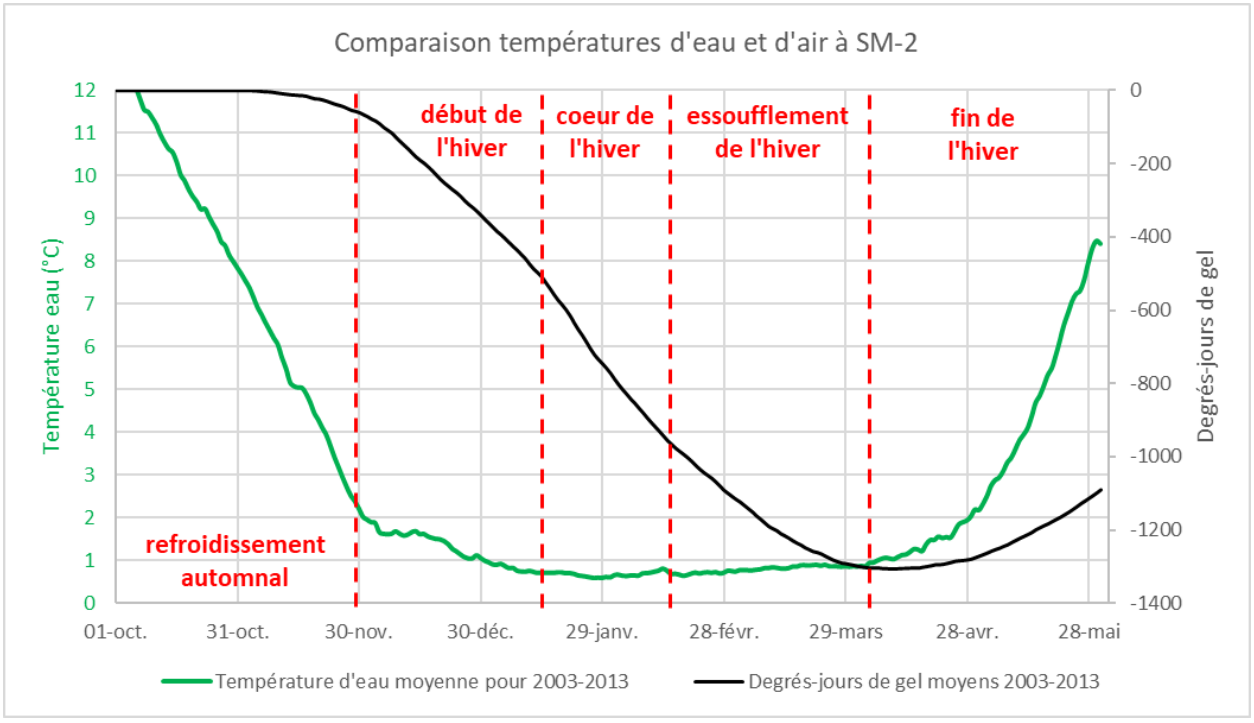


Figure 4.12 Comparaison des températures d'eau et d'air pour 2003-2013 à SM-2

5 HYDRAULICITÉ

5.1 Débits

Les paliers de débits horaires entre les mois de décembre et mars sont montrés à la Figure 5.1 pour la centrale SM-3 (2004-2025), à la Figure 5.3 pour le PK 75 (2010-2025) et à la Figure 5.5 pour la centrale SM-2 (2004-2025). Les séries chronologiques de débits totaux sont montrées à la Figure 5.2 pour SM-3, à la Figure 5.4 pour le PK 75 et à la Figure 5.6 pour SM-2, entre les mois d'octobre et mai.

Les données de SM-3 montrent bien les paliers de fonctionnement des groupes turbine-alternateur en place qui possèdent une capacité de 150 m^3/s par groupe et une capacité de 300 m^3/s pour la centrale à deux groupes (Figure 5.2). En effet, il est possible de voir que les données se concentrent au débit d'arrêt (0 m^3/s), au débit à un groupe (entre 90 et 150 m^3/s) et au débit à deux groupes (entre 190 et 325 m^3/s). De plus, il est possible de constater la mise en marche du second groupe à partir de l'hiver 2006-2007 (Figure 5.1). De manière générale, une forte concentration du régime à deux groupes est constatée entre la mi-décembre et la mi-mars en raison de la plus grande demande énergétique à ce moment, puis l'utilisation d'un seul groupe est plus fréquente après la fin de l'hiver glaciologique. Aucun débit n'est déversé à la centrale SM-3 en raison de la capacité élevée de son réservoir et de la gestion hydrique réalisée par Hydro-Québec. Notons que l'arrêt et le démarrage des turbines provoquent la création d'ondes qui se propagent dans les réservoirs de SM-3 et de SM-2.

Les débits passant au PK 75 sont dans l'ensemble semblables à ceux turbinés à SM-3 dans leur répartition (Figure 5.3 et Figure 5.4). Toutefois, la tranche de 10 à 90 m^3/s, généralement inférieure à 5 % à SM-3, a tendance à augmenter visiblement de quelques points de pourcentage au PK 75 en raison des apports hydrologiques naturels dans le bassin versant intermédiaire. En effet, les apports dans le bras court-circuité de la rivière Sainte-Marguerite créent une augmentation du débit entre la centrale SM-3 (PK 76,5) et le PK 75.

Les débits totaux à SM-2 incluent les débits turbinés et les débits déversés. Contrairement à SM-3, la centrale SM-2 doit déverser une partie du débit y transitant en raison de son réservoir environ 10 fois plus petit que celui de SM-3 et de son débit d'équipement inférieur à celui de SM-3. Les débits totaux à SM-2 varient typiquement entre 50 et 300 m^3/s (Figure 5.6). Ils se trouvent majoritairement au débit d'équipement de la centrale qui est de 70 m^3/s, soit au palier 10-100 m^3/s, ou encore au débit de la centrale SM-3 avec deux groupes en marche, soit au palier 200-300 m^3/s (Figure 5.5). Les débits à SM-2 montrent une tendance moyenne à la hausse entre le 1er octobre et la mi-décembre. Entre la mi-décembre et la mi-février, la moyenne est autour de 200 m^3/s, mais la gamme de variation demeure entre 50 et 300 m^3/s. À partir de la mi-février, la moyenne baisse graduellement jusqu'à la fin avril. À la mi-mars, la limite supérieure de l'enveloppe de 300 m^3/s commence à baisser jusqu'à la fin avril pour atteindre 240 m^3/s pour quelques cas et 150 m^3/s pour la majorité des cas.

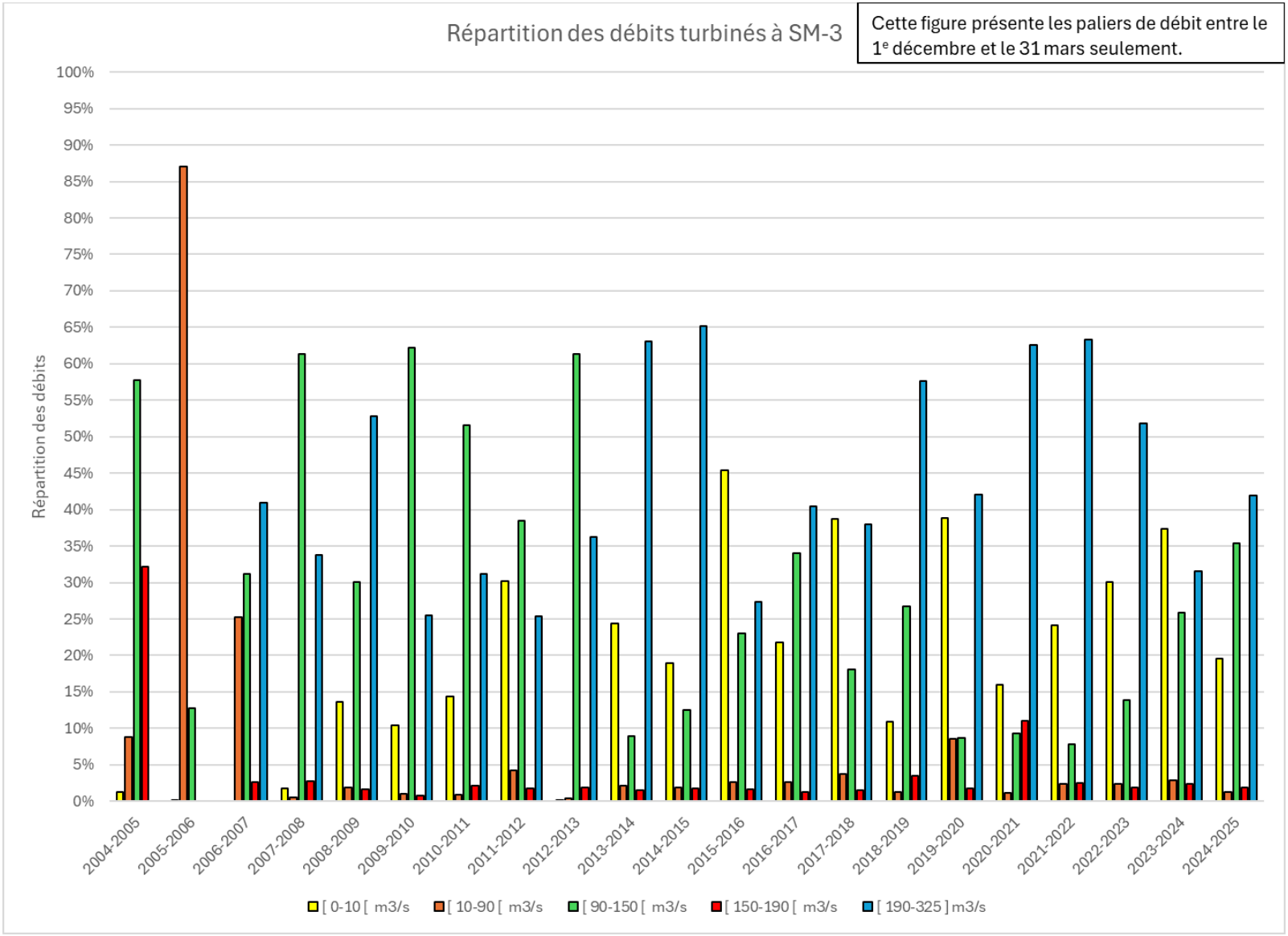


Figure 5.1 Paliers de débits turbinés horaires pour 2004-2025 (1 déc.-31 mars) – Centrale SM-3

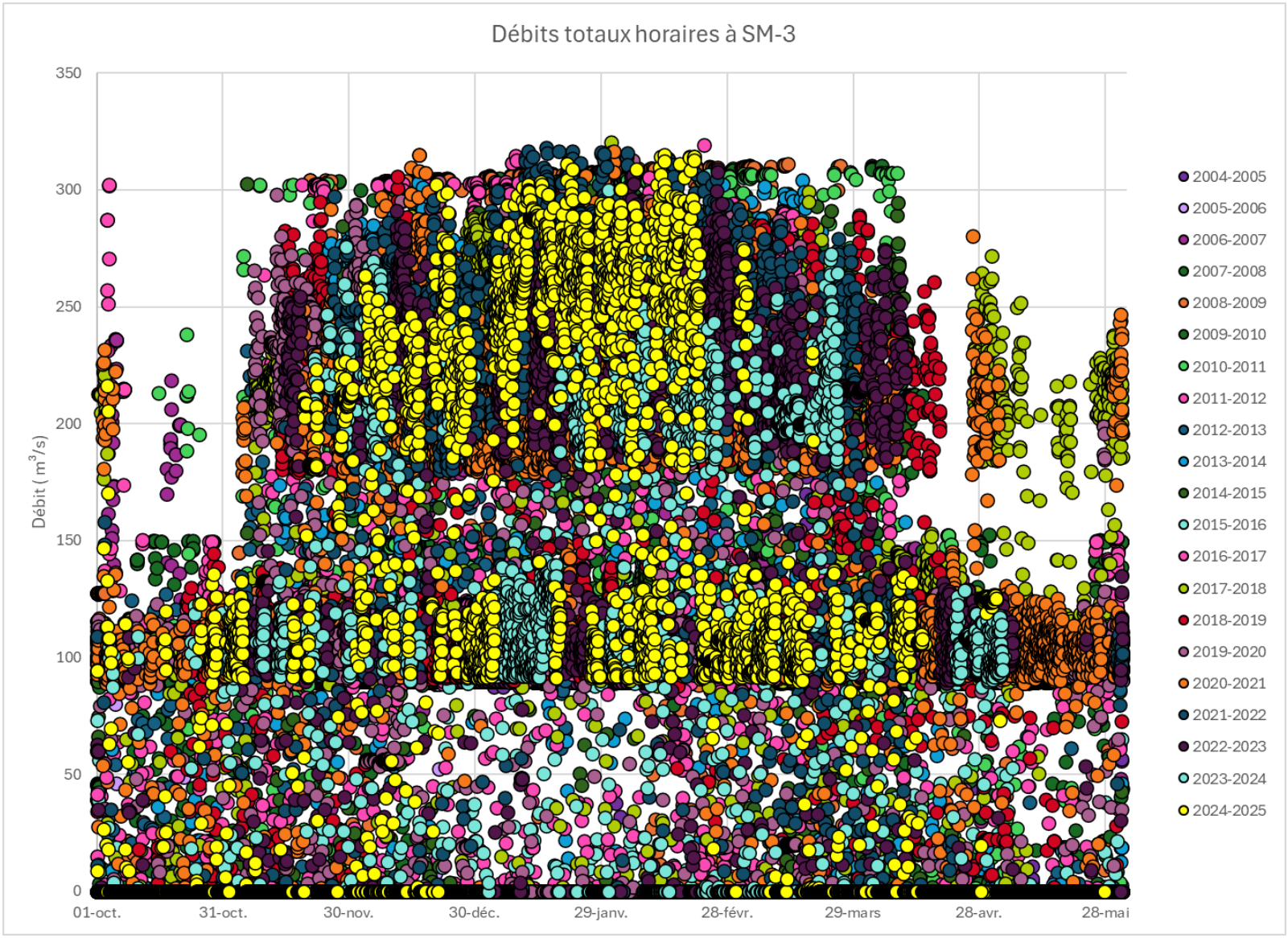


Figure 5.2 Évolution temporelle des débits totaux horaires pour 2004-2025 – Centrale SM-3

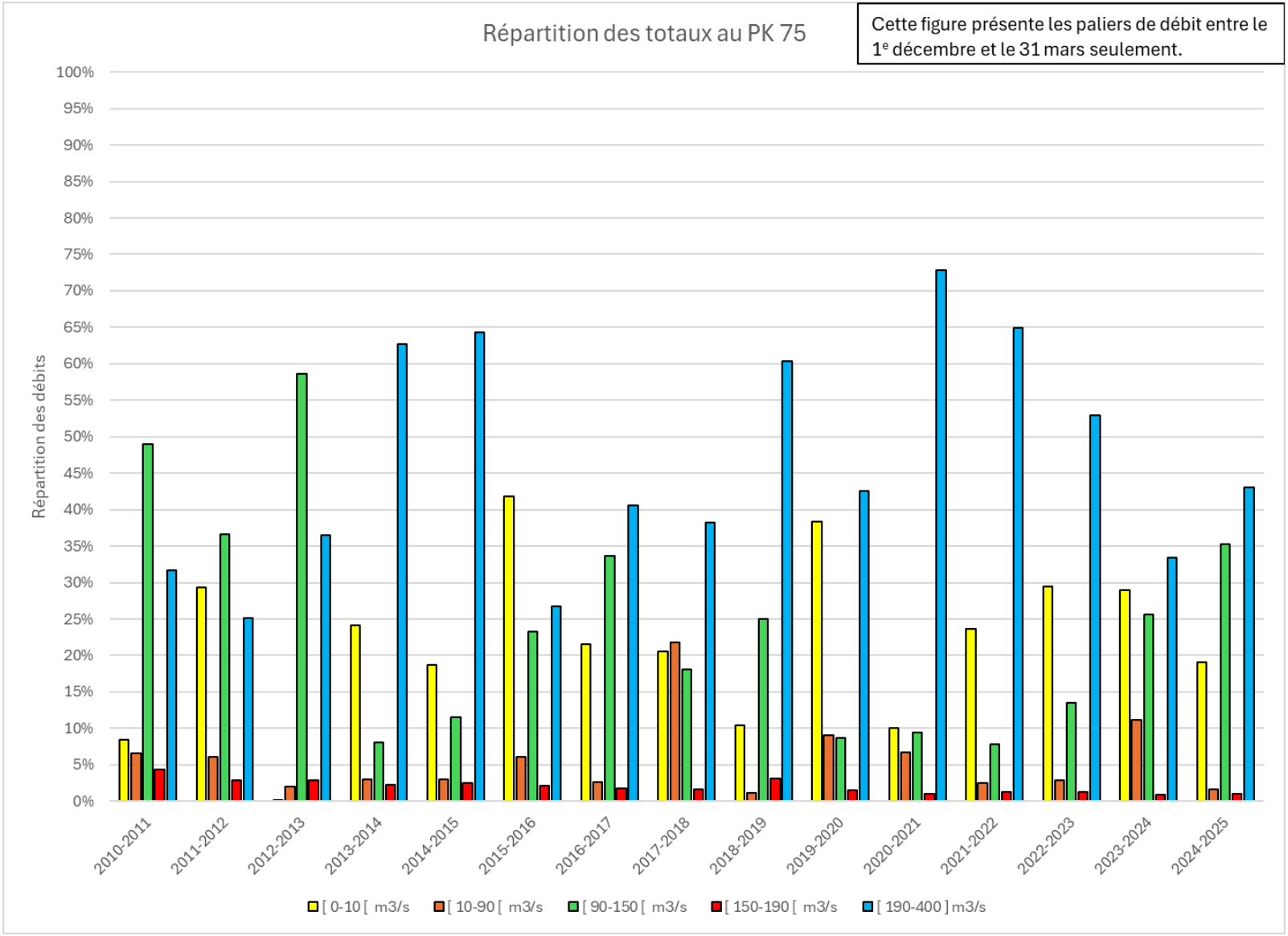


Figure 5.3 Paliers de débits horaires pour 2010-2025 (1 déc.-31 mars) – PK 75

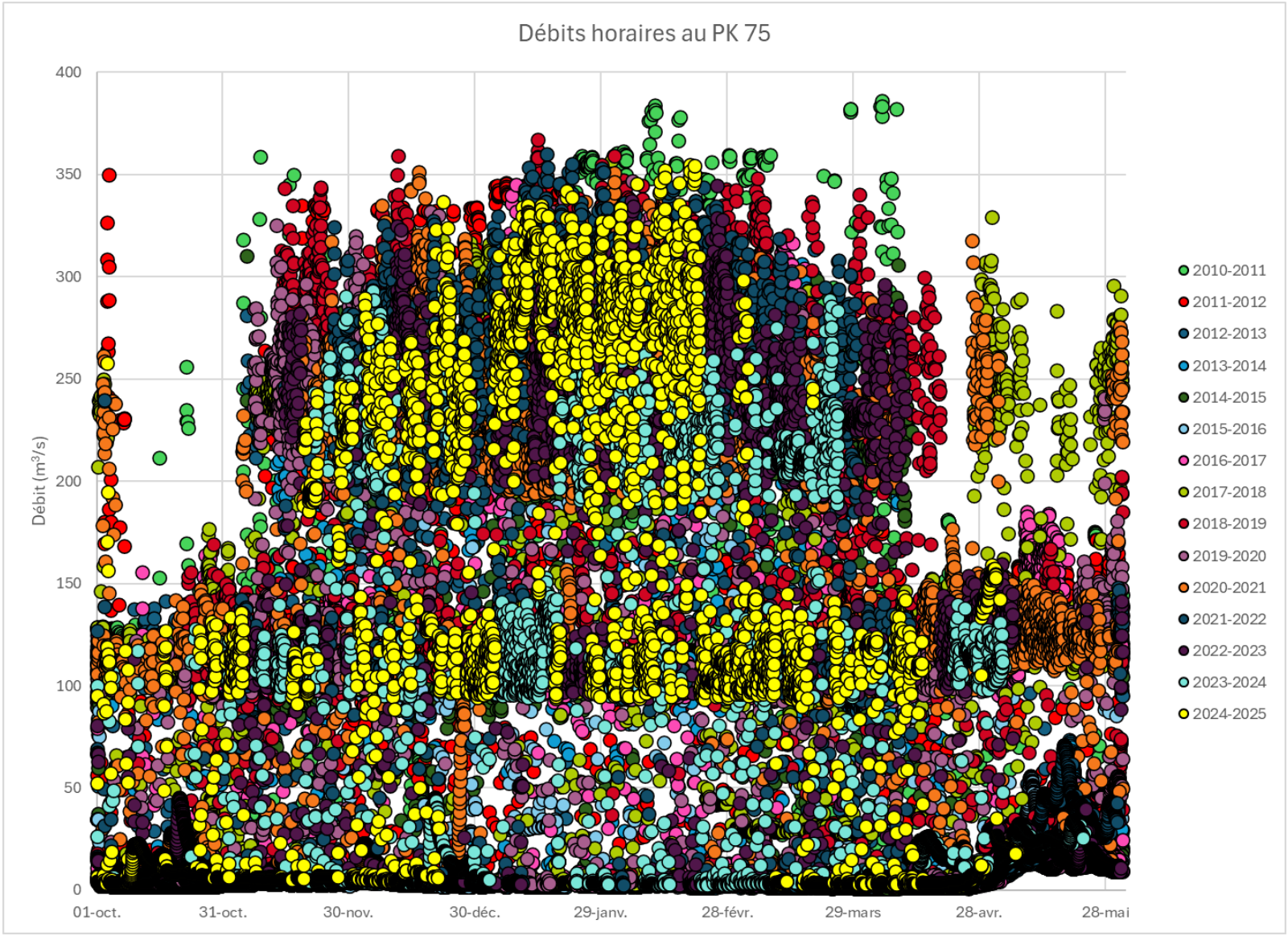


Figure 5.4 Évolution temporelle des débits horaires pour 2010-2025 – PK 75

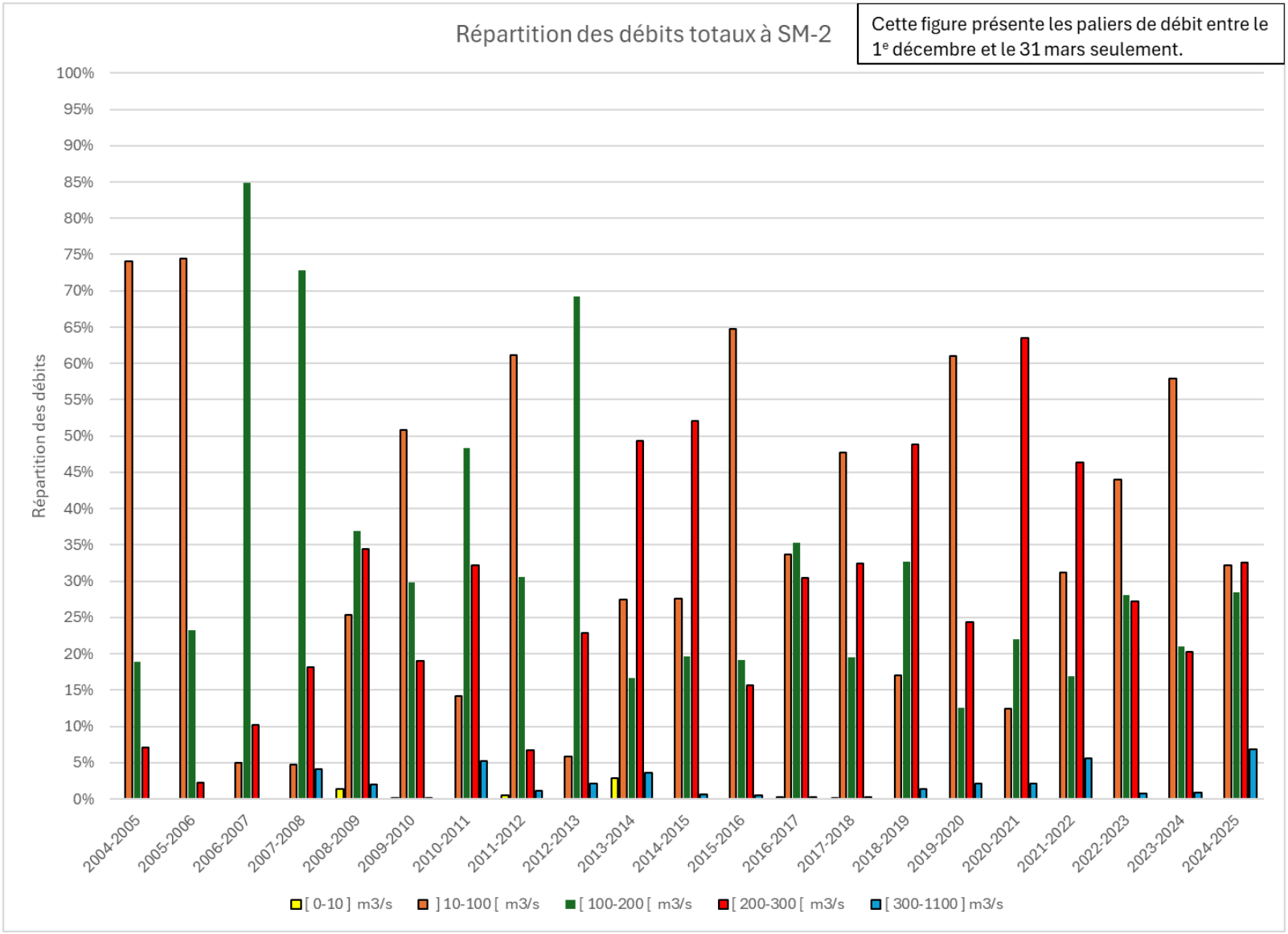


Figure 5.5 Paliers de débits totaux horaires pour 2004-2025 (1 déc.-31 mars) – Centrale SM-2

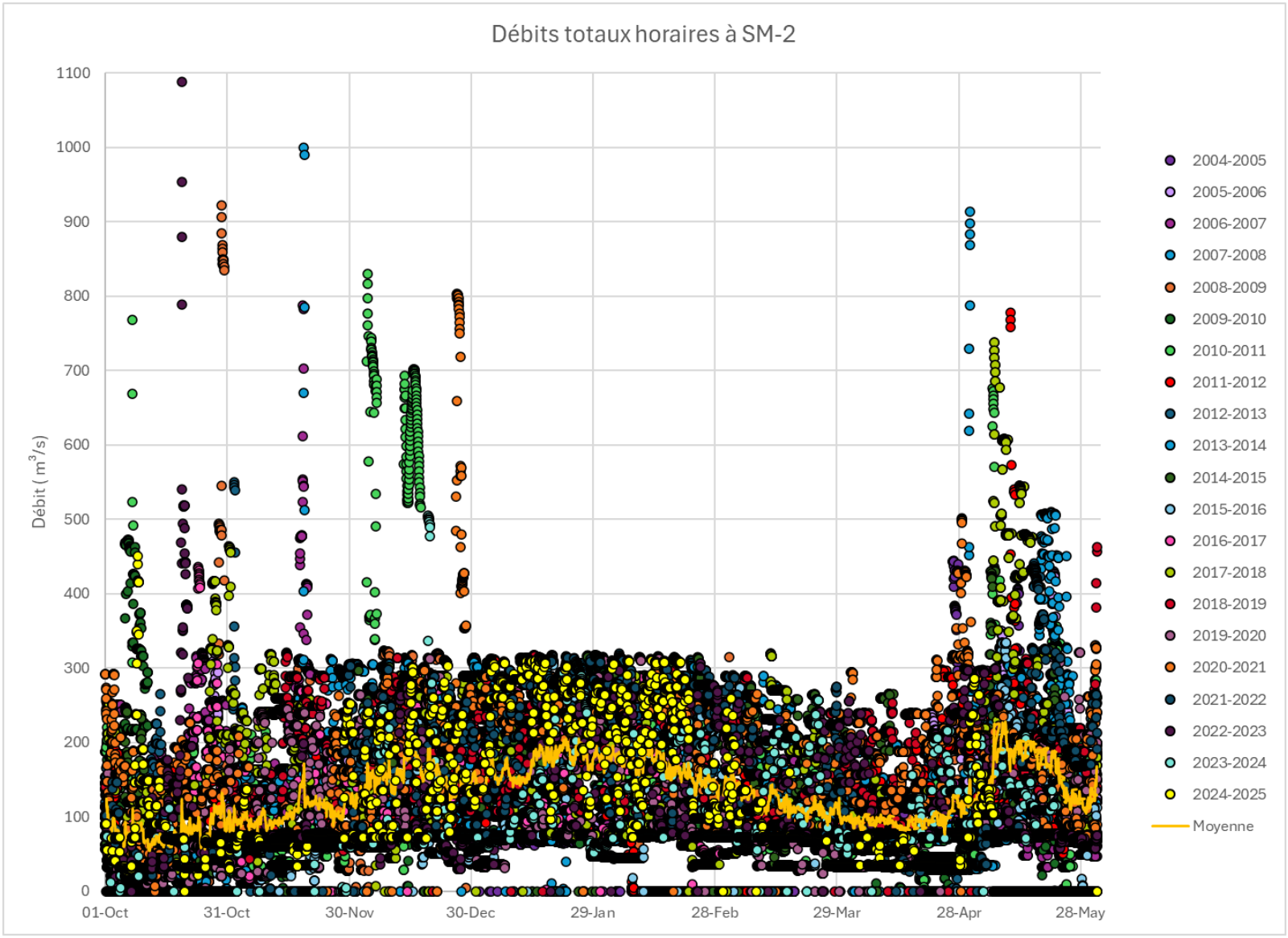


Figure 5.6 Évolution temporelle des débits totaux horaires pour 2004-2025 – Centrale SM-2

5.2 Niveaux d'eau

Les niveaux d'eau quotidiens d'octobre à mai sont montrés à l'amont de chaque centrale, soit à la Figure 5.7 pour la centrale SM-3 (2004-2025), à la Figure 5.9 pour la centrale SM-2 (2004-2025) et à la Figure 5.11 pour la centrale SM-1 (2009-2025). Les niveaux quotidiens à la sortie de la centrale SM-3 (PK 75) sont montrés à la Figure 5.8 (2010-2025). La Figure 5.10 présente la variation du niveau d'eau dans le réservoir de SM-2 à la suite d'un démarrage rapide, qui peut durer entre 15 et 45 minutes, de la centrale de SM-3 d'un débit nul au régime à deux groupes (0-300 m^3/s) à l'aide des données au pas de temps 5 minutes. Les points utilisés pour calculer le marnage sont affichés sur la Figure 5.10 et le Tableau 5.1 présente les valeurs obtenues.

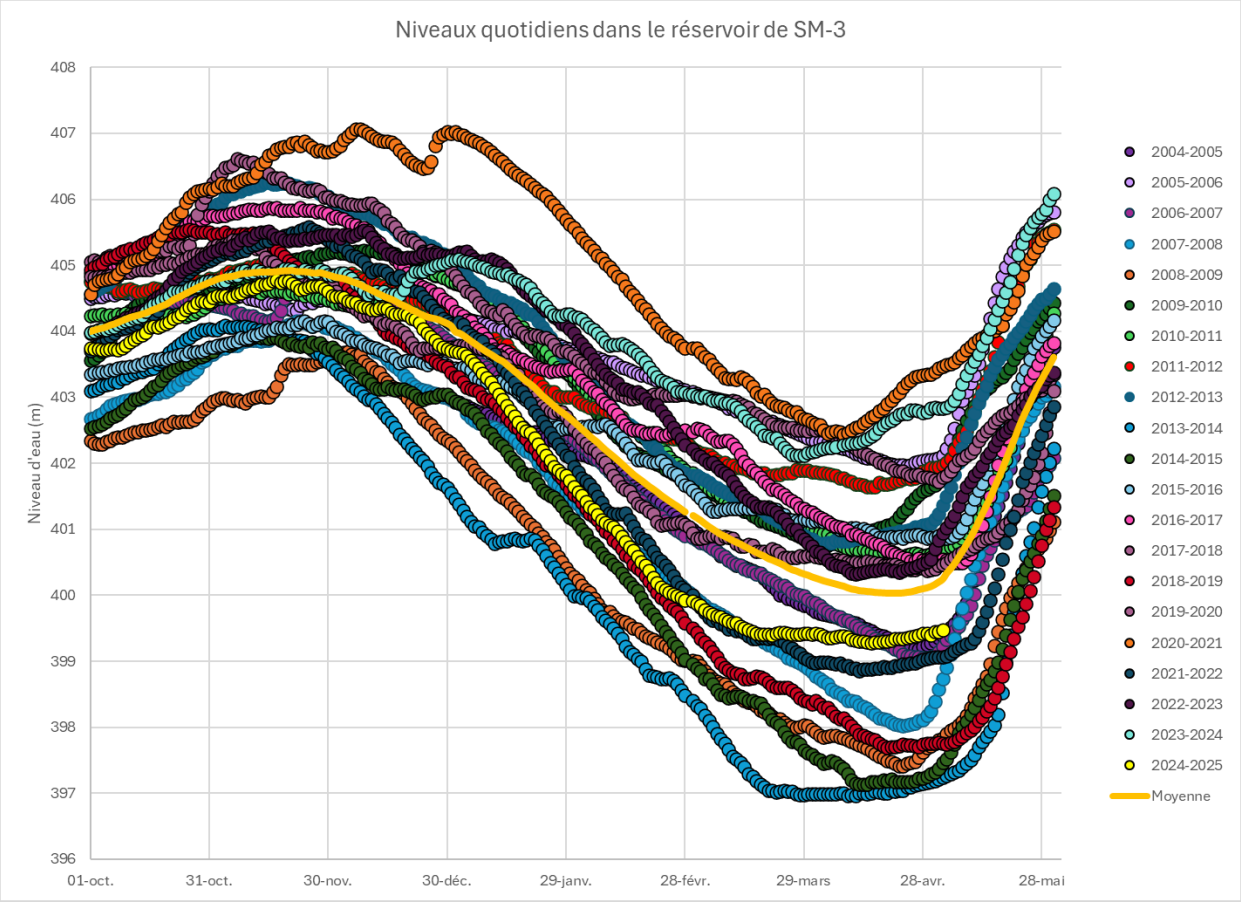


Figure 5.7 Niveaux quotidiens pour la période 2004-2025 – Réservoir SM-3

Les courbes de niveau d'eau saisonnières à l'amont de la centrale SM-3 illustrent les règles de gestion du réservoir (Figure 5.7). Il y a une diminution des niveaux au début de l'hiver glaciologique, soit à partir de la mi-novembre, et une remontée environ deux semaines après la fin de l'hiver glaciologique, à la fin avril. L'enveloppe des niveaux d'eau pour 2004-2025 peut être

tracée à l'aide de l'hiver 2013-2014 qui connait des niveaux très faibles (minimum à 396,97 m en date des 9 et 11 avril) et de l'hiver 2020-2021 qui connait des niveaux très élevés (maximum 407,02 m au 30 décembre) tout au long de l'hiver.

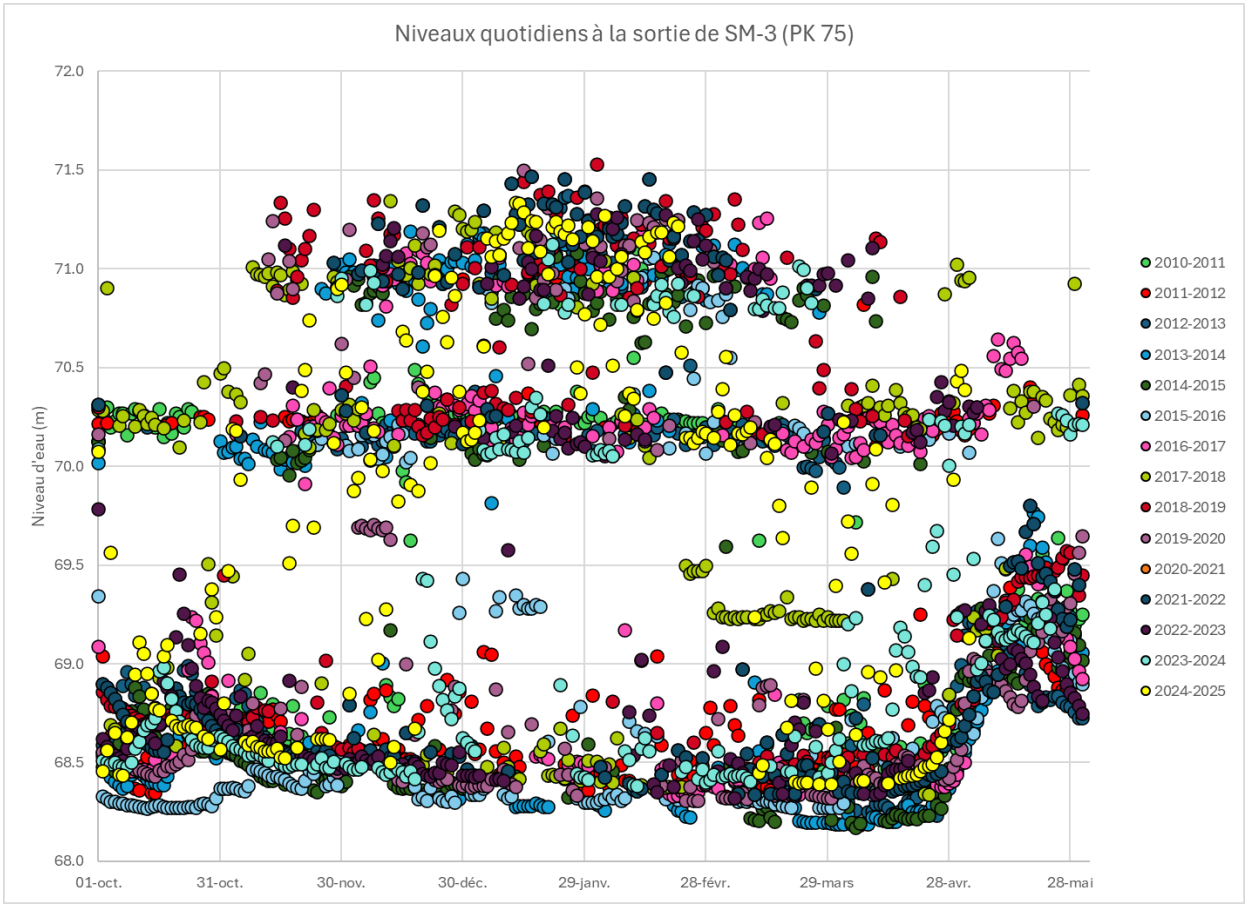


Figure 5.8 Niveaux quotidiens pour la période 2010-2025 – Aval de la centrale SM-3 (PK 75)

Les niveaux d'eau se divisent en trois paliers à la sortie de la centrale de SM-3 (PK 75) où ils se concentrent autour de 68,5 m, 70,3 m et 71,0 m (Figure 5.8). Ces trois paliers correspondent aux paliers de débits présentés à la Figure 5.1 et à la Figure 5.2, soit le débit nul, à un groupe et à deux groupes en fonction.

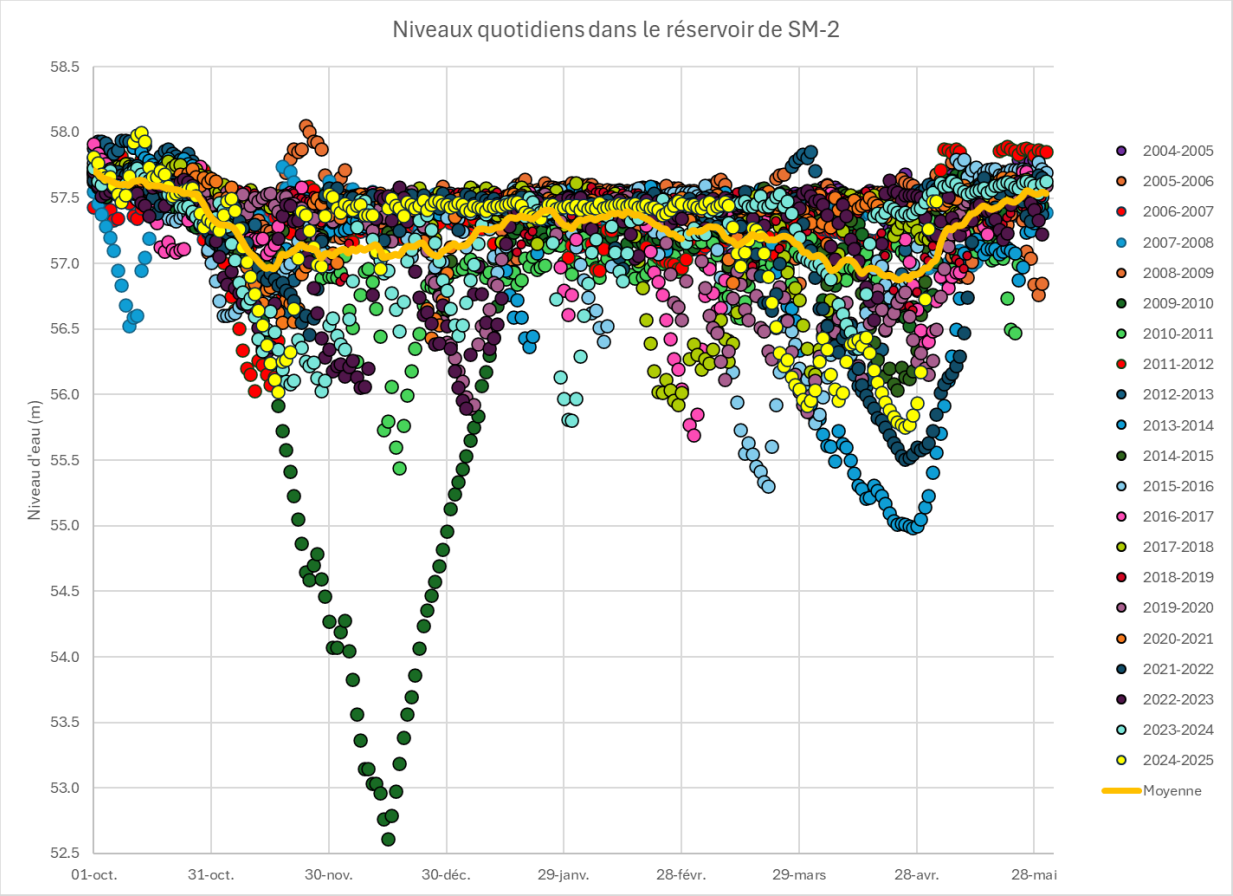


Figure 5.9 Niveaux quotidiens pour la période 2004-2025 – Réservoir SM-2

Dans le réservoir de SM-2, des baisses de niveau périodiques créent une plus grande variabilité dans les données qu'à SM-3 (Figure 5.9). Des niveaux très bas sont observés en début de saison pour les hivers 2010-2011 (55,40 m le 18 décembre) et 2009-2010 (52,57 m le 15 décembre), ce dernier offrant également la valeur minimale de l'ensemble des séries étudiées. Des hausses de niveau importantes ont lieu durant l'hiver 2005-2006 à la fin novembre et durant l'hiver 2012-2013 à la fin mars. Au cœur de l'hiver, la moyenne du niveau du réservoir varie entre 57,0 et 57,3 m, et le niveau d'eau dépasse rarement 57,6 m. À partir de la fin mars, les niveaux d'eau ont tendance à baisser et des valeurs particulièrement faibles ont été enregistrées durant les hivers 2013-2014, 2015-2016 et 2021-2022.

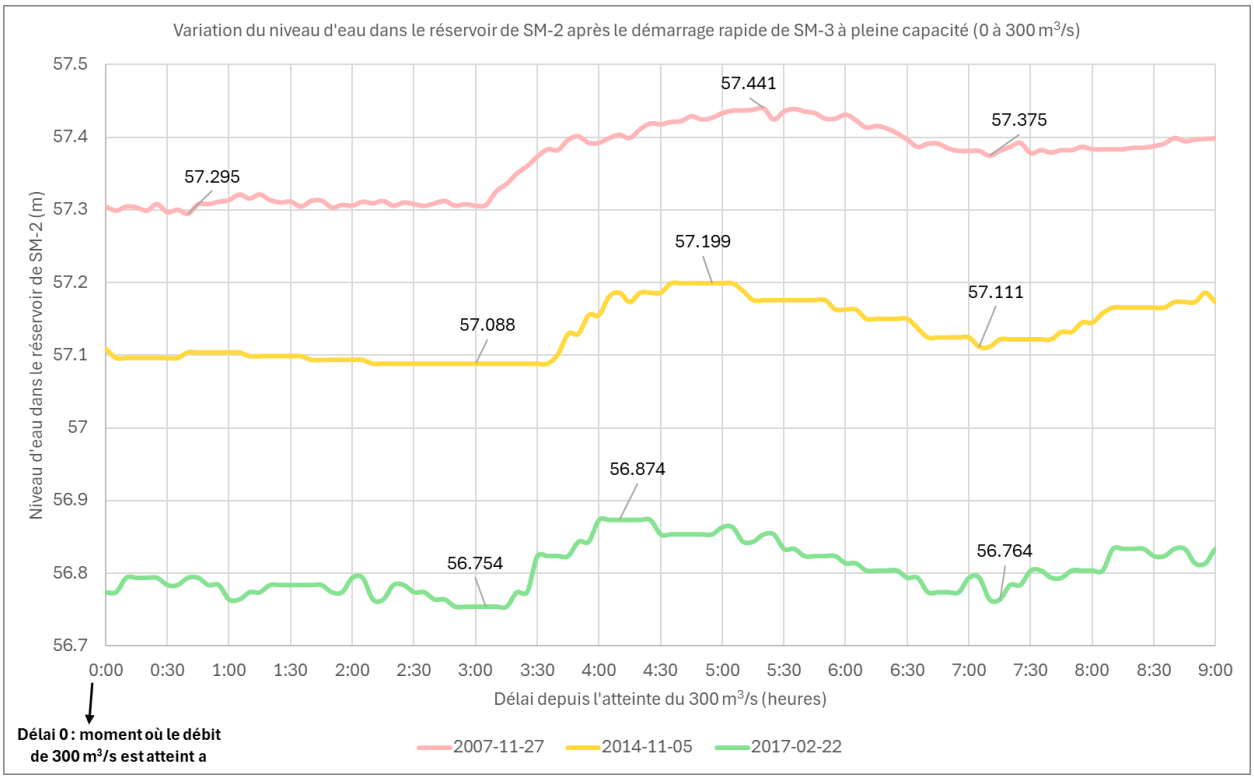


Figure 5.10 Variation du niveau d'eau dans le réservoir de SM-2 après le démarrage rapide de SM-3 de 0 à 300 m^3/s

Tableau 5.1 Marnage dans le réservoir de SM-2 à la suite du démarrage rapide de SM-3 en conditions actuelles (0-300 m^3/s)

Statistique	Marnage à la hausse	Marnage à la baisse
Minimum	0,110 m	0,039 m
Moyenne	0,116 m	0,079 m
Maximum	0,120 m	0,110 m

Le temps pour passer du débit de 0 m^3/s à un débit de 300 m^3/s a été de 40-45 minutes pour les événements de 2007 et 2017 et de 15 minutes pour l'événement de 2014. La Figure 5.10 montre qu'il passe une vague laminée dans le réservoir de SM-2 durant environ trois heures après l'atteinte du débit de 300 m^3/s lors d'un démarrage rapide à SM-3. La variation de niveau d'eau est donc calculée entre ce plateau et le moment où le niveau cesse d'augmenter, puis entre la fin de cette augmentation et la fin de la diminution subséquente. La variation du niveau d'eau à la hausse va de 0,110 m à 0,120 m avec une moyenne de 0,116 m et la variation à la baisse va de 0,039 m à 0,110 m avec une moyenne de 0,079 m.

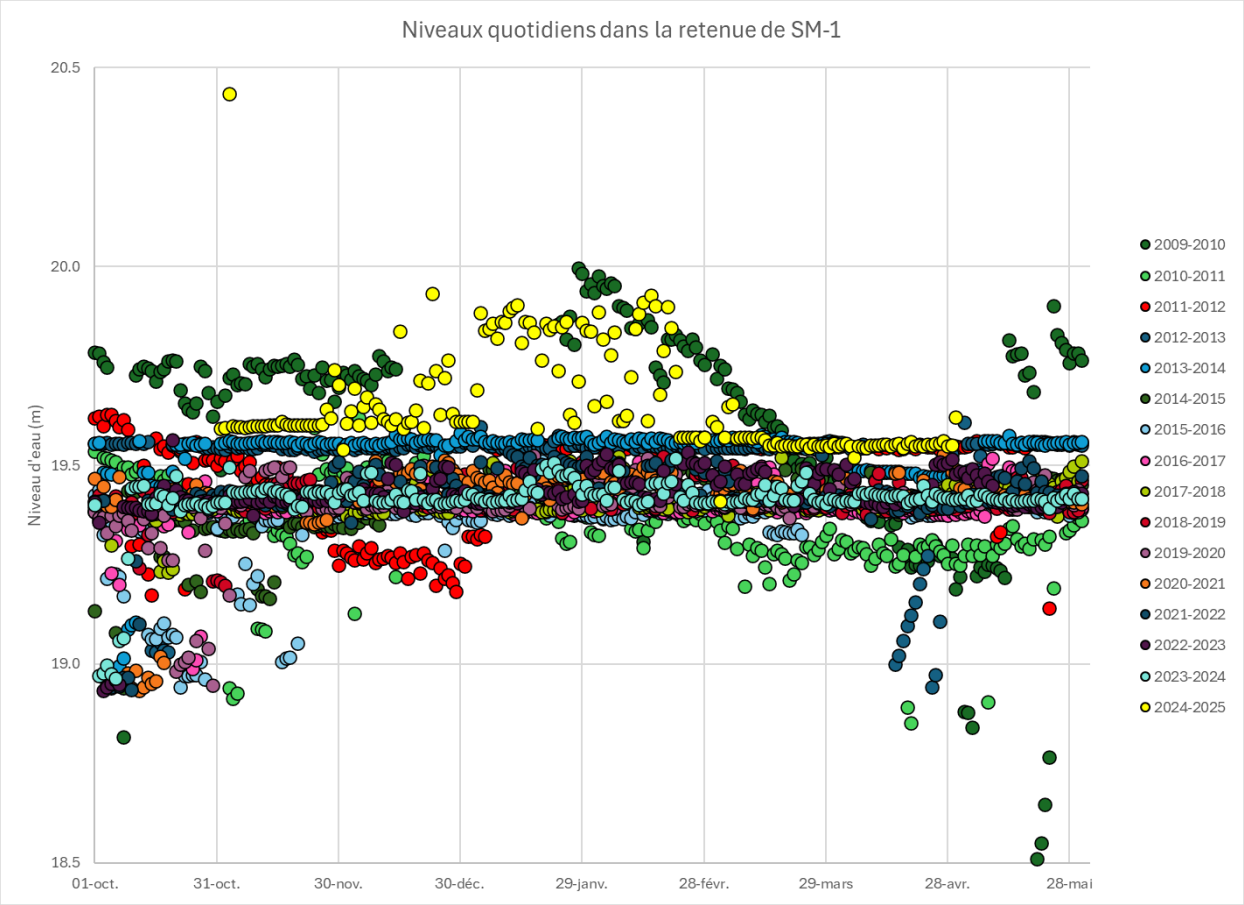


Figure 5.11 Niveaux quotidiens pour la période 2009-2025 – Retenue SM-1

La retenue de SM-1 voit son niveau varier principalement entre 19,2 et 20,0 m pour la période hivernale (Figure 5.11). Il est à noter que la crête déversante du barrage de SM-1 est équipée des vannes de type Obermeyer depuis 2013, ce qui permet de régler l'élévation de la crête déversante entre les élévations 18,8 et 20,0 m. Des valeurs extrêmes (possiblement causées par des pannes aux sondes ou des manœuvres d'exploitation inhabituelles) ont été enregistrées durant l'hiver 2009-2010 avec des valeurs entre 18,5 et 18,8 m au mois de mai.

5.3 Vitesses d'écoulement

Les vitesses simulées par modèle numérique 1D pour le tronçon séparant la centrale SM-3 et le PK 50 (Lasalle|NHC, Ajout d'un troisième groupe turbine-alternateur à la centrale SM-3 - Étude des conditions hydrauliques en rivière – Tronçon de la centrale SM-3 à PK 50, 2025) sont présentées à la Figure 5.12, en conditions actuelles (débit de 300 m^3/s avec deux groupes) et projetées (débit de 500 m^3/s avec trois groupes). L'écart entre les deux périodes y est également tracé.

En conditions de référence, les vitesses sont de l'ordre de 1,5-2,5 m/s dans le tronçon fluvial à l'aval de la centrale SM-3, jusqu'au PK 66. Elles sont en diminution dans le tronçon entre les PK 65 et 60, passant de 1,5 à 0,30 m/s. Les vitesses d'écoulement se stabilisent autour de 0,2-0,5 m/s dans le réservoir de SM-2, entre les PK 60 et 50.

En conditions futures, les vitesses augmentent de 0,2 à 0,6 m/s pour le tronçon fluvial et la partie amont du réservoir de SM-2 (jusqu'au PK 60) et de 0,1 à 0,2 m/s entre les PK 60 et 50. Les vitesses d'écoulement élevées entre les PK 76,5 et 60 combinées aux températures de l'eau positives tout au long de l'hiver empêchent la formation d'un couvert de glace à l'aval de la centrale SM-3 (voir section 7.1.4).

Le champ des vitesses simulé par modèle numérique 2D entre les centrales SM-2 et SM-1 (Lasalle|NHC, Ajout d'un troisième groupe turbine-alternateur à la centrale Sainte-Marguerite - Étude des conditions hydrauliques en rivière - Tronçon SM-1-SM-2 – 60%, 2025) en conditions actuelles (débit de 300 m^3/s avec deux groupes) est montré à la Figure 5.13[1].

Les vitesses en aval de la centrale SM-2 à un débit de 300 m^3/s sont supérieures à 1 m/s. Pour les tronçons de 1 km de longueur à la sortie de SM-2 et à l'entrée de la retenue de SM-1, les vitesses se concentrent autour de 0,6-0,8 m/s dans le chenal, mais sont quasi stagnantes le long des rives. La section au centre connait des vitesses plus faibles avec des valeurs de 0,5 m/s et moins, même dans le chenal central. Les vitesses accélèrent sur la partie aval de la retenue atteignant des valeurs de 0,6-0,9 m/s dans le chenal avec de faibles vitesses le long des rives. Les vitesses supérieures à 0,6 m/s dans le chenal de la majorité du tronçon SM2-SM1 causent la formation d'un couvert de glace instable et les températures de l'eau constamment supérieures à 0,6 °C favorisent l'amincissent par érosion thermique, et ce, dès que la vitesse dépasse 0,1-0,2 m/s.

Le secteur estuarien en aval de SM-1 subit quant à lui à la fois les fluctuations de débits à l'exutoire de l'aménagement SM-1, le marnage de la marée du golfe du Saint-Laurent et l'inversion des courants de marée. Il s'agit donc d'un tronçon possédant un régime hydraulique extrêmement transitoire.

[1] Le champ des vitesses en conditions futures après l'ajout du troisième groupe n'est pas disponible pour le tronçon SM2-SM1 au moment de la rédaction de ce rapport.

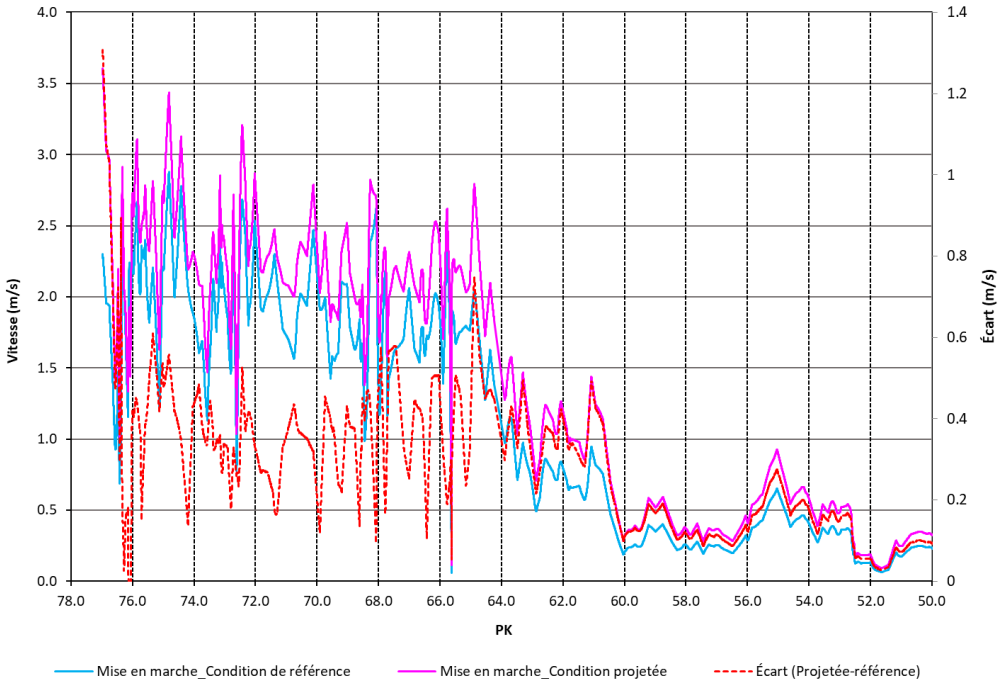


Figure 5.12 Vitesses en conditions actuelles (300 m^3/s) et projetées (500 m^3/s) – Centrale SM-3 au PK 50

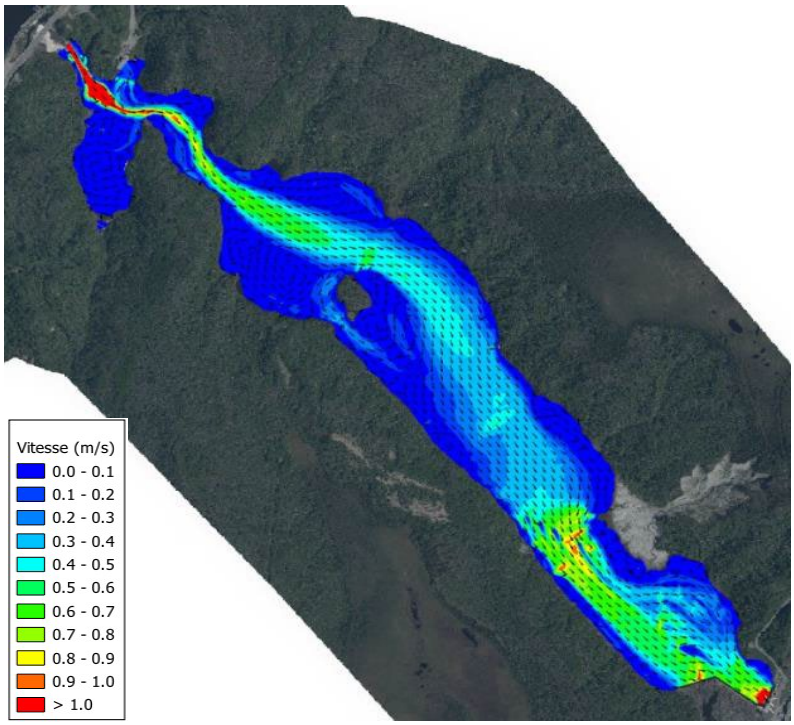


Figure 5.13 Vitesses en conditions actuelles (300 m^3/s) – Tronçon SM-2 à SM-1

6 SUIVIS DES GLACES EFFECTUÉS PAR HYDRO-QUÉBEC

6.1 Observations générales

Hydro-Québec a effectué un suivi des glaces pour les hivers entre 2002 et 2005 et entre 2023 et 2025. Les observations de ce suivi se résument ainsi :

- 2002-2003 : Débits turbinés à SM-3 entre 60 et 200 m^3/s. Le bord frontal a reculé du PK 63 au PK 57 en janvier et février 2003. Il y a une couverture de glace mince derrière le bord frontal jusqu'au PK 52 et des ouvertures dans le couvert entre les PK 51 et 49;

- 2003-2004 : Débits turbinés à SM-3 maintenus à 200 m^3/s entre la mi-décembre et le début mars. Le bord frontal est passé du PK 46 au PK 57 avec la progression de l'hiver. La limite aval de la couverture de glace mince se situe au PK 35 au cœur de l'hiver et au PK 26 au début comme à la fin de l'hiver. Le couvert de glace se dégrade à l'aval du PK 35 à l'apparition de trous à l'aval de ce point;

- 2004-2005 : Débits turbinés à 100 m^3/s du 13 décembre 2004 au 8 février 2005 (excepté les 1-2 février avec 50 m^3/s), puis ont été augmentés à 200 m^3/s. Comme pour l'hiver 2002-2003, le bord frontal était entre les PK 58 et 61,5 au débit de 100 m^3/s, puis a reculé au PK 46,5. Cette année confirme qu'en période d'exploitation de pointe hivernale, les débits plus faibles durant la nuit ne sont pas suffisants pour compenser la perte d'épaisseur du couvert causée par les pointes durant le jour. Le rapport de suivi prédit qu'avec le débit de 300 m^3/s, les zones à risque de glace mince sont les suivantes : PK 15,7 à 16, PK 18 à 23 et l'ensemble du réservoir à l'amont du PK 26,25. La prise des glaces est estimée être retardée de 22 jours à ce débit;

- 2023-2024 : Débits turbinés à SM-3 sont de 0-300 m^3/s en décembre, 100-150 m^3/s (un groupe) en janvier et sont majoritairement de 200-300 m^3/s (deux groupes) en février et mars. Durant le turbinage à un seul groupe, le bord frontal passe au PK 60. Au cœur de l'hiver (27 février), des ouvertures importantes dans le couvert sont observées au PK 37;

- 2024-2025 : Débit turbiné de 100-300 m^3/s durant les mois de janvier et février, puis réduction au régime à un groupe en mars. Le bord frontal complet oscille entre les PK 35 et 52 durant les mois de janvier à mars. D'importantes ouvertures dans le couvert sont observables au cœur de l'hiver (février) entre les PK 35 et 40.

En somme, l'augmentation du débit au turbinage à deux groupes (300 m^3/s) crée plus d'ouvertures dans le couvert de glace que le turbinage à un groupe. Le mois de février turbine souvent à deux groupes depuis que ce mode d'exploitation a été introduit en 2007. Des éclaircies dans le couvert de glace sont notées dans différents secteurs du réservoir de SM-2, notamment entre les PK 15 et 40 ainsi qu'entre les PK 49 et 51.

6.2 Survols héliportés

Des survols héliportés ont été effectués par Hydro-Québec dans le cadre de campagnes de suivi des glaces. Entre trois et sept survols ont été réalisés par hiver. Notons que le réservoir de SM-3 ainsi que les 10 km près de l'estuaire n'ont pas nécessairement été couverts pour chacun de ces survols ce qui explique la variabilité du nombre d'images présentées d'une année à l'autre et d'une zone à l'autre. Cette section présente une seule image pour chaque zone et la progression de chacun des hivers est montrée à l'annexe A.

6.2.1 Réservoir SM-3

Pour un hiver moyen comme celui de 2003-2004, le réservoir de SM-3 est en cours de fermeture à la mi-décembre avec un pourcentage de fermeture élevé montrant plusieurs ouvertures. Pour un hiver clément comme celui de 2023-2024, le réservoir est encore libre de glace en date du 20 décembre. On peut en conclure, qu'un couvert de glace se forme au mois de décembre dans le réservoir de SM-3 et reste en place pour la durée de l'hiver glaciologique. Ce couvert stable peut potentiellement servir aux déplacements en motoneige, tel que montré à la . Cette glace fond ensuite sur place tard au printemps, soit durant le mois de mai. En fin d'hiver, il est possible de distinguer de la « slush » le long des rives, indiquant la présence de fissures par lesquelles l'eau remonte en surface et se mélange à la neige, tel que montré à la .



Figure 6.1 Piste de motoneige (suivant la ligne pointillée) dans le réservoir de SM-3 – Survol du 27 février 2024 (zone 1, PK 131)

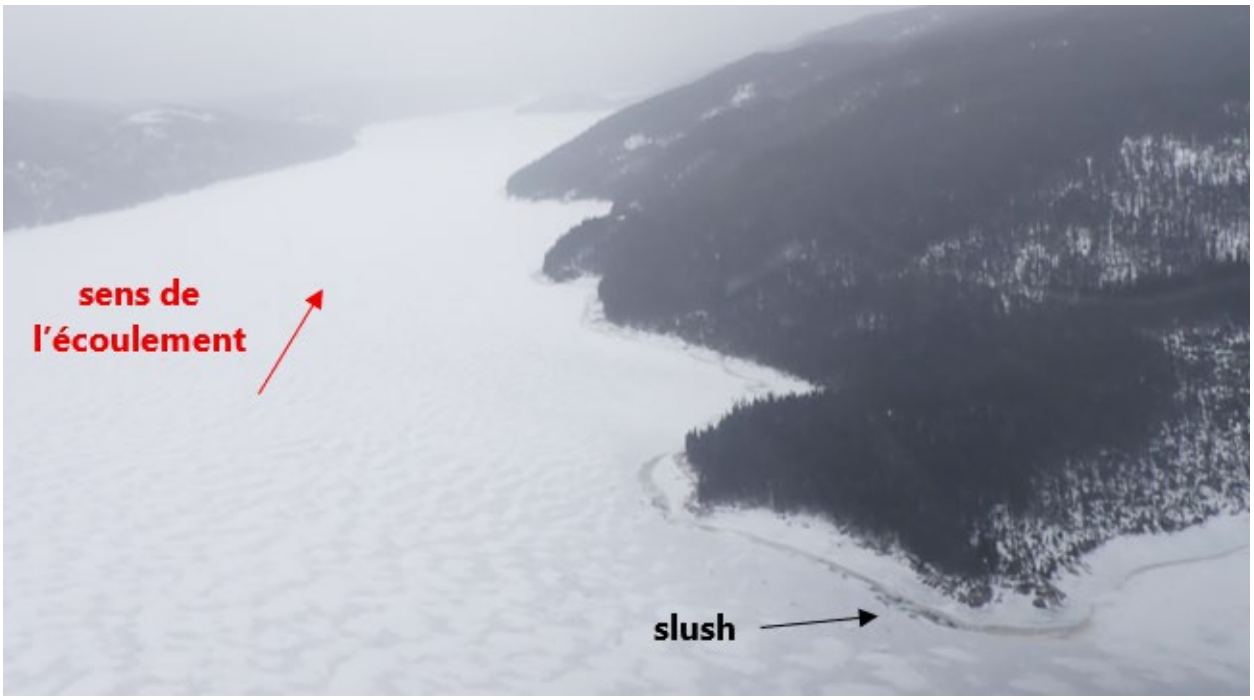


Figure 6.2 « Slush » le long des rives – Survol du 23 avril 2024 (zone 2, PK 98)

6.2.2 Tronçon entre les centrales SM-3 et SM-2

Un couvert de glace se forme très rarement et pendant peu de temps dans la zone 3 en raison de la température de l'eau soutirée du réservoir de SM-3 qui est au-dessus du point de congélation et des vitesses d'écoulement élevées dans cette zone (voir sections 4.2 et 5.3). Ainsi, il est considéré que cette section reste en eau libre durant tout l'hiver, tel que le montrent les survols effectués durant les cinq hivers du suivi des glaces. Notons que la formation d'un couvert de glace complet dans la zone 3 est possible lorsque le débit est nul à SM-3, ce qui ne survient jamais de façon prolongée.

Il peut toutefois y avoir formation de glace de rives, ce qui est observé pour tous les hivers sauf pour l'hiver 2024-2025, et ces périodes avec de la glace de rives sont plus longues durant les hivers de 2002-2005 que pour l'hiver 2023-2024. De plus, l'image du 27 février 2024, présentée à la Figure 6.3, montre que les courts tronçons partiellement couverts de glace au cœur de l'hiver ne sont pas couverts de neige indiquant que le couvert de glace ne reste pas en place très longtemps.



Figure 6.3 Tronçon partiellement couvert de glace sans neige – Survol du 27 février 2024 (zone 3, PK 68)

La prise des glaces dans le réservoir de SM-2 a généralement lieu au début du mois de décembre pour les zones 5 et 6 et plus tard dans le mois pour la zone 4 qui est encore en eau libre à la mi-décembre pour un hiver moyen (2003) et à la fin décembre pour un hiver clément (2023). La prise est retardée de quelques jours pour la période récente par rapport à 2002-2005, particulièrement dans la partie amont du réservoir.

Aucun tronçon avec du frasil à la dérive n'a pu être observé dans la zone d'étude en raison des températures de l'eau positives, et ce, même au cœur de l'hiver. Toutefois, la formation d'un couvert à partir de plaques de glace minces à la dérive *(« skim ice »)* a pu être observée lors du survol du 20 décembre 2023 dans le réservoir SM-2 (PK 38). Ceci est montré à la Figure 6.4.

Plusieurs événements de formation et départs de glace peuvent avoir lieu annuellement dans le réservoir de SM-2, particulièrement dans la partie amont du réservoir. Ainsi, deux événements de formation et départ de glace ont été captés par les survols de la zone 4 lors de l'hiver 2003-2004. Pour un hiver clément comme celui de 2024-2025, la zone 4 ne forme qu'un couvert de courte durée et partiel, soit entre les PK 45 et 55 pour cette année, tel que montré à la Figure 6.5.

Les zones 5 et 6 forment généralement un couvert stable qui reste en place tout l'hiver après la fin décembre ou au début du mois de janvier. Des ouvertures sont aperçues durant plusieurs hivers dans le couvert du réservoir de SM-2, entre les PK 35 et 40 (zone 5) et près du PK 26 (zone 6). Un exemple est montré à la Figure 6.6.

Notons que la stabilité du couvert, soit sa capacité à rester en place durant une longue période, n'a pas de lien avec la présence d'éclaircies dans celui-ci. En effet, un couvert stable qui reste en place tout l'hiver peut comporter des ouvertures à certains endroits où se forment des chenaux préférentiels où l'écoulement a lieu à des vitesses modérées, comme c'est le cas dans d'autres réservoirs.

Le départ des glaces a généralement lieu avant la fin de l'hiver glaciologique dans la zone 4 qui peut connaitre d'importantes ouvertures dès la mi-mars (2005) et est complètement libre de glace à la fin du mois d'avril 2024. Le départ a généralement lieu après la fin de l'hiver glaciologique dans les zones 5 et 6, le 23 avril 2024 étant la seule date à montrer la rivière en eau libre au printemps pour ces deux zones parmi les images de survols disponibles. La date de départ demeure semblable entre les deux périodes étudiées pour l'ensemble du réservoir de SM-2.



Figure 6.4 Formation du couvert à partir de plaques de glace minces à la dérive *(« skim ice »)* – Survol du 20 décembre 2023 (zone 5, PK 38)



Figure 6.5 Couvert partiel entre les PK 45 et 55 – Survol du 3 mars 2025 (zone 4, PK 52)

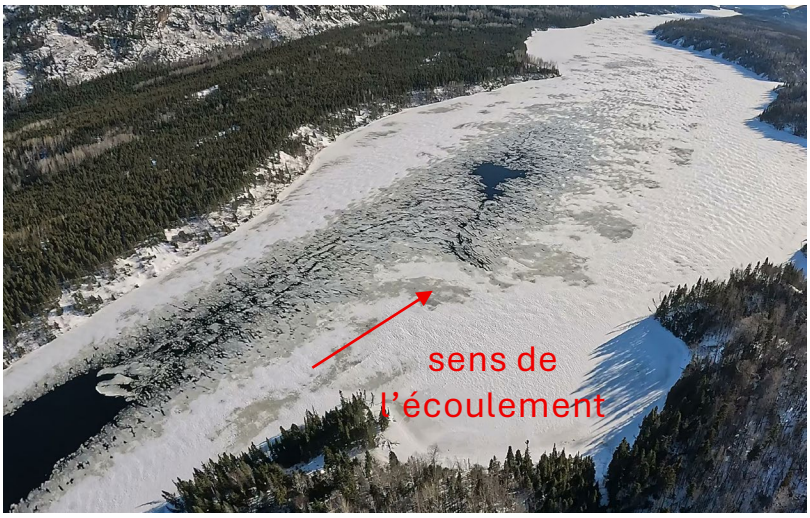


Figure 6.6 Ouvertures dans le couvert du réservoir SM-2 – Survol du 19 février 2025 (zone 6, PK 35)

6.2.3 Retenue de SM-1

Dans la retenue de SM-1, la prise des glaces n'a jamais lieu avant la toute fin du mois de décembre et peut avoir lieu jusqu'à la mi-février. La glace y est généralement très instable et le couvert n'est souvent que partiel. L'image à la montre un couvert typique entre les centrales SM-2 et SM-1, soit avec des bandes de glace de rives assez larges et un chenal en eau libre au centre. Les seuls survols ayant capté des couverts possédant une emprise significative sont ceux de 2002-2003 et 2004-2005 qui sont parmi les hivers les plus froids des 23 dernières années. Le départ des glaces a généralement lieu au début du mois de mars et au plus tard à la fin du mois.



Figure 6.7 Couvert typique entre les centrales SM-2 et SM-1 – Survol du 27 février 2024 (zone 7.1, PK 8)

6.2.4 Estuaire de la rivière Sainte-Marguerite

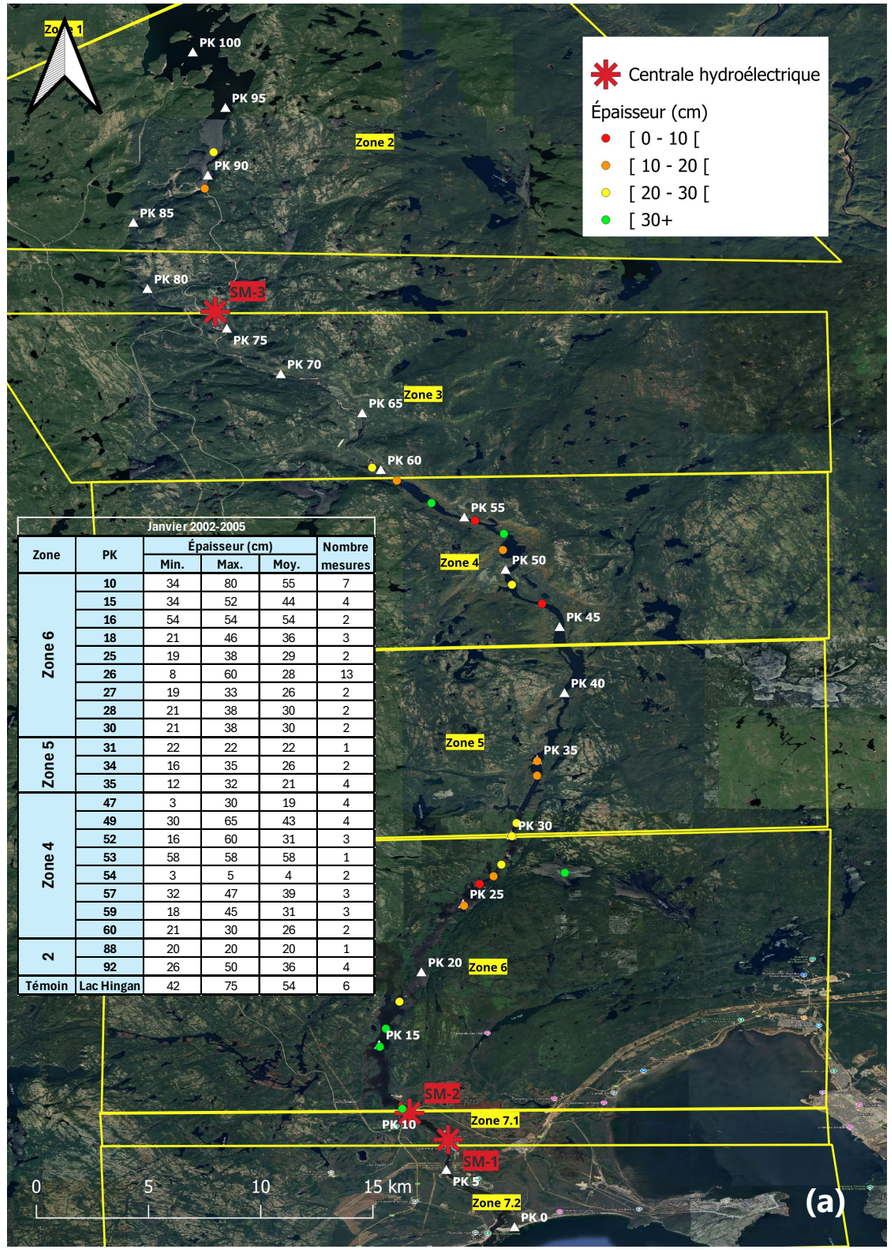
Le secteur de l'estuaire est généralement en eau libre durant le mois de décembre puisque la prise y a lieu en moyenne à la mi-janvier. La glace y est plutôt instable et n'est souvent présente que dans l'embouchure à l'amont de la flèche littorale, comme le montrent les images de l'hiver 2024-2025. Un couvert complet s'y installe toutefois sur quelques kilomètres pour une partie de l'hiver tel que montré par le couvert enneigé des quatre hivers avec assez de survols pour observer ceci. Le couvert est fragilisé par des fissures le long des rives, créées par les variations de débit dues à la centrale en amont du tronçon et les mouvements de marée, tel que montré à la . Le départ a généralement lieu à la mi-mars et au plus tard à la fin du mois, un départ tardif ayant été observé lors de l'hiver 2004-2005 qui est l'un des plus froids de la série étudiée.



Figure 6.8 Fissure le long de la rive dans la zone estuarienne – Survol du 27 février 2024 (zone 7.2, PK 2)

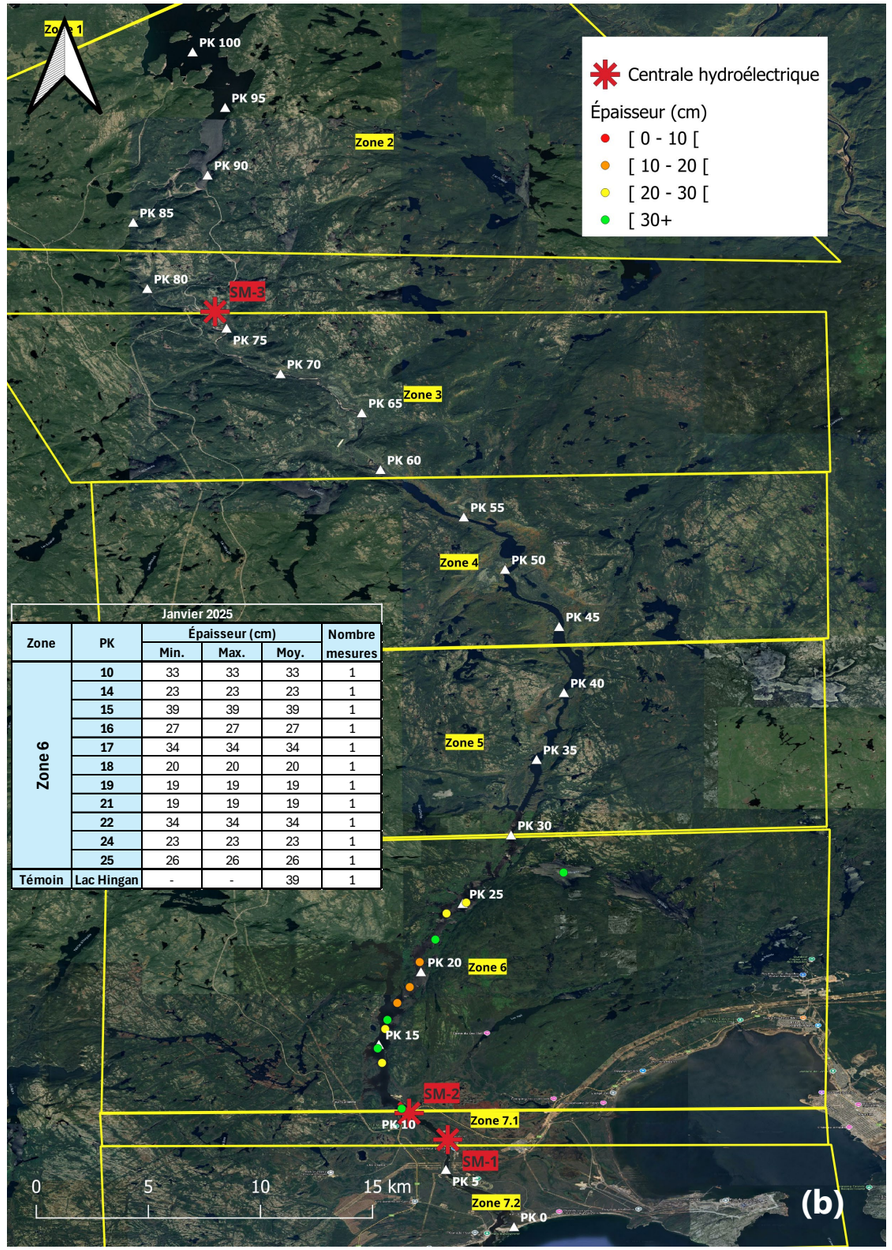
6.3 Mesures d'épaisseurs de glace

Des mesures d'épaisseurs de glace ont été réalisées entre 2002 et 2005 et en 2025. La Figure 6.9 présente tous les points où des épaisseurs de glace ont été mesurées durant les mois de janvier 2002-2005 et 2025, la Figure 6.10 montre les épaisseurs des mois de février 2002-2005 et 2025 alors que la Figure 6.11 présente les épaisseurs pour le mois de mars 2025 (aucune mesure prise en mars pour 2002-2005). Les valeurs localisées sur ces cartes représentent le minimum mensuel mesuré à chaque point kilométrique. Les valeurs extrêmes, la moyenne et le nombre de mesures effectuées à chaque point y sont aussi montrés en tableaux.



Janvier 2002-2005

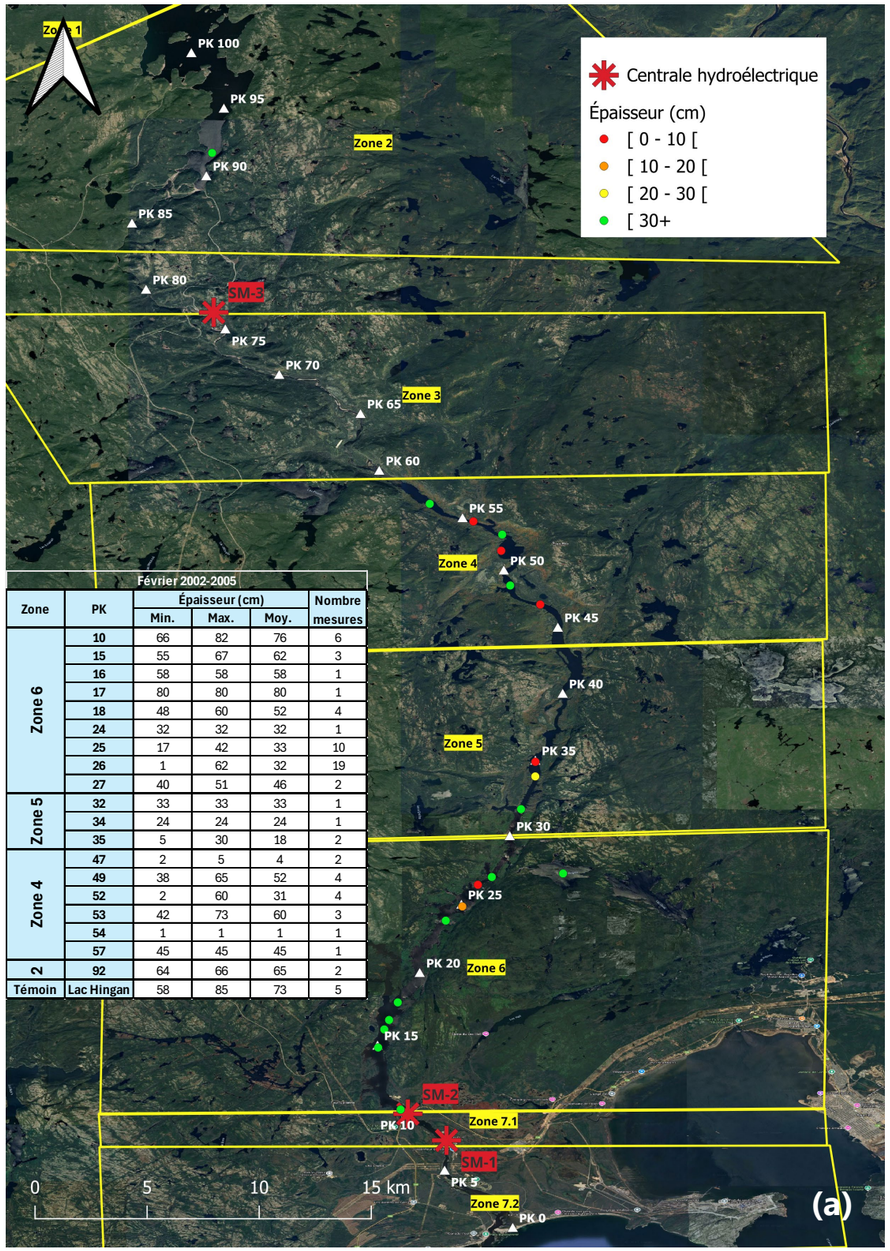
Zone	PK	Épaisseur (cm)			Nombre mesures
		Min.	Max.	Moy.	
Zone 6	10	34	80	55	7
	15	34	52	44	4
	16	54	54	54	2
	18	21	46	36	3
	25	19	38	29	2
	26	8	60	28	13
	27	19	33	26	2
	28	21	38	30	2
	30	21	38	30	2
Zone 5	31	22	22	22	1
	34	16	35	26	2
	35	12	32	21	4
Zone 4	47	3	30	19	4
	49	30	65	43	4
	52	16	60	31	3
	53	58	58	58	1
	54	3	5	4	2
	57	32	47	39	3
	59	18	45	31	3
	60	21	30	26	2
2	88	20	20	20	1
	92	26	50	36	4
Témoin	Lac Hingan	42	75	54	6



Janvier 2025

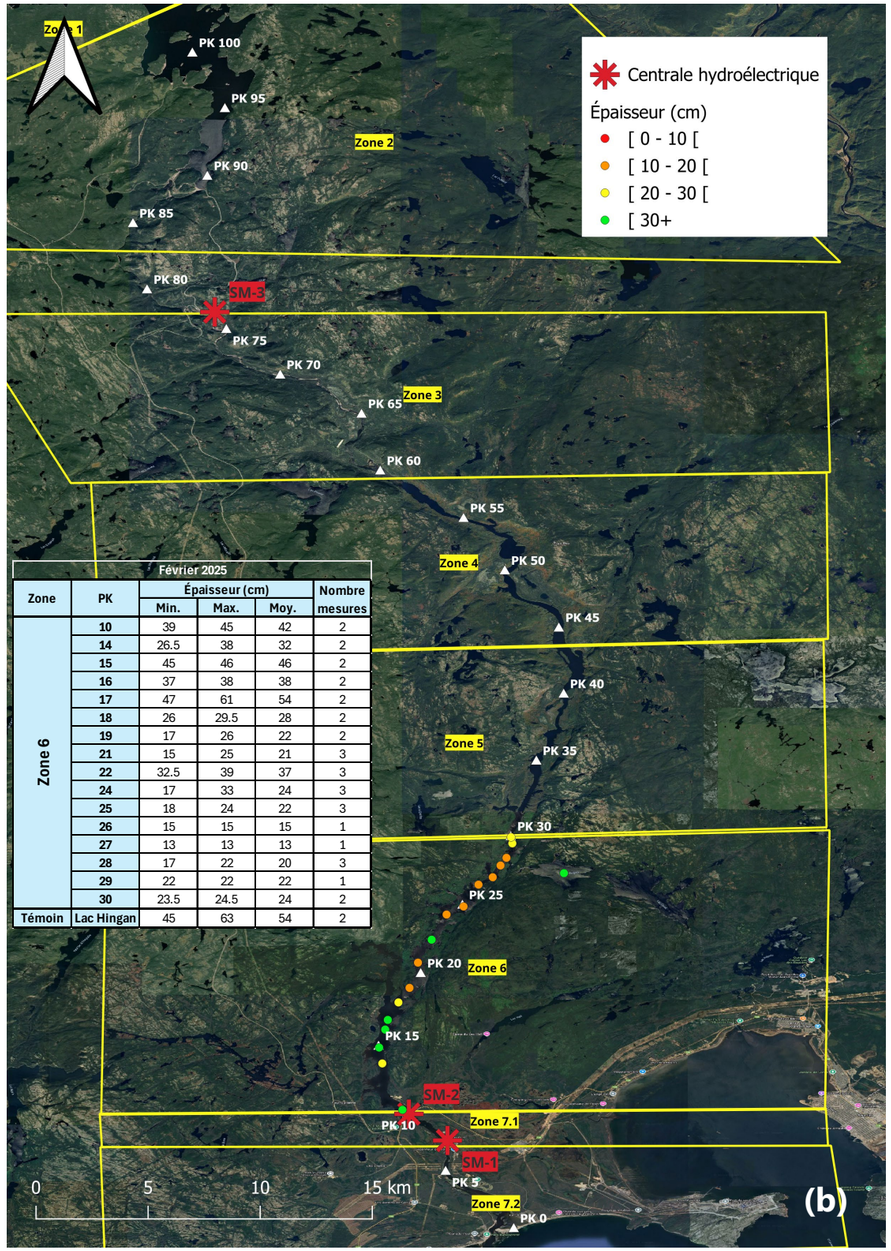
Zone	PK	Épaisseur (cm)			Nombre mesures
		Min.	Max.	Moy.	
Zone 6	10	33	33	33	1
	14	23	23	23	1
	15	39	39	39	1
	16	27	27	27	1
	17	34	34	34	1
	18	20	20	20	1
	19	19	19	19	1
	21	19	19	19	1
	22	34	34	34	1
	24	23	23	23	1
	25	26	26	26	1
Témoin	Lac Hingan	-	-	39	1

Figure 6.9 Points de mesure du suivi des glaces Hydro-Québec de janvier (a) 2002-2005 et (b) 2025 (valeur minimale par PK montrée sur la carte)



Février 2002-2005

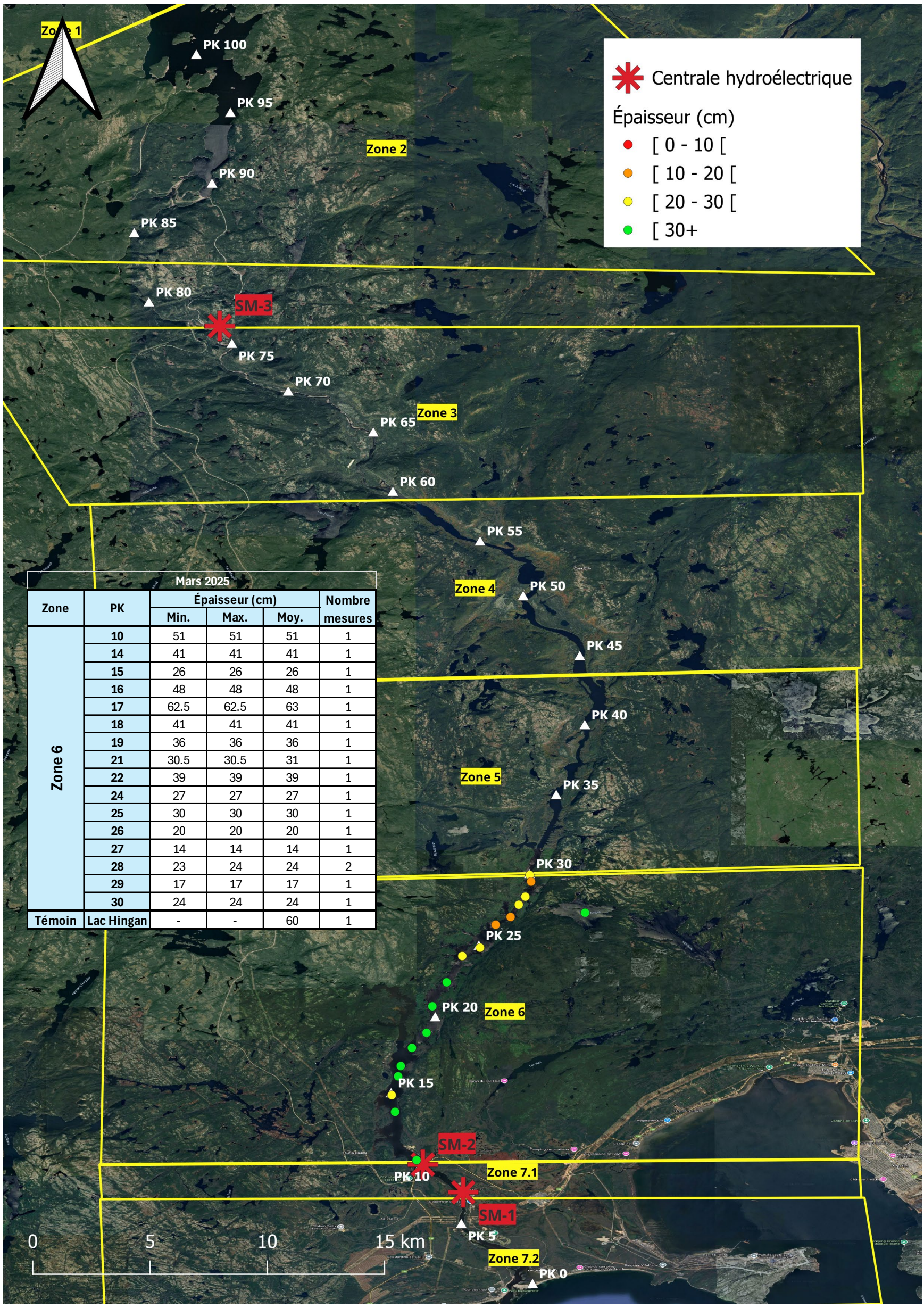
Zone	PK	Épaisseur (cm)			Nombre mesures
		Min.	Max.	Moy.	
Zone 6	10	66	82	76	6
	15	55	67	62	3
	16	58	58	58	1
	17	80	80	80	1
	18	48	60	52	4
	24	32	32	32	1
	25	17	42	33	10
	26	1	62	32	19
	27	40	51	46	2
Zone 5	32	33	33	33	1
	34	24	24	24	1
	35	5	30	18	2
Zone 4	47	2	5	4	2
	49	38	65	52	4
	52	2	60	31	4
	53	42	73	60	3
	54	1	1	1	1
	57	45	45	45	1
2	92	64	66	65	2
Témoin	Lac Hingan	58	85	73	5



Février 2025

Zone	PK	Épaisseur (cm)			Nombre mesures
		Min.	Max.	Moy.	
Zone 6	10	39	45	42	2
	14	26.5	38	32	2
	15	45	46	46	2
	16	37	38	38	2
	17	47	61	54	2
	18	26	29.5	28	2
	19	17	26	22	2
	21	15	25	21	3
	22	32.5	39	37	3
	24	17	33	24	3
	25	18	24	22	3
	26	15	15	15	1
	27	13	13	13	1
	28	17	22	20	3
	29	22	22	22	1
	30	23.5	24.5	24	2
Témoin	Lac Hingan	45	63	54	2

Figure 6.10 Points de mesure du suivi des glaces Hydro-Québec de février (a) 2002-2005 et (b) 2025 (valeur minimale par PK montrée sur la carte)



Mars 2025

Zone	PK	Épaisseur (cm)			Nombre mesures
		Min.	Max.	Moy.	
Zone 6	10	51	51	51	1
	14	41	41	41	1
	15	26	26	26	1
	16	48	48	48	1
	17	62.5	62.5	63	1
	18	41	41	41	1
	19	36	36	36	1
	21	30.5	30.5	31	1
	22	39	39	39	1
	24	27	27	27	1
	25	30	30	30	1
	26	20	20	20	1
	27	14	14	14	1
	28	23	24	24	2
	29	17	17	17	1
	30	24	24	24	1
Témoin	Lac Hingan	-	-	60	1

Figure 6.11 Points de mesure du suivi des glaces Hydro-Québec de mars 2025 (valeur minimale par PK montrée sur la carte)

Dans la zone 2 (PK 105 à 85), huit épaisseurs de glace ont été mesurées durant le suivi de 2002-2005, toutes au PK 92 à l'exception d'une seule située à la prise d'eau (PK 88) où une épaisseur de 20 cm a été relevée au mois de janvier. Il est à noter que l'épaisseur relevée à la prise d'eau SM-3 n'a pas été utilisée pour estimer le coefficient B, car la dynamique à ce site ne reflète pas celle du reste du réservoir en raison de l'accélération de l'écoulement dans le canal d'amenée. Les épaisseurs au PK 92 varient de 13 cm pour une mesure prise en décembre à 66 cm pour une mesure prise en février. Rappelons que la zone 2 n'est pas touchée par la variation du débit sortant de la centrale SM-3.

Dans la zone 4 (PK 60 à 45), 38 épaisseurs ont été mesurées entre les PK 60 et 47 durant le suivi de 2002-2005. Ces épaisseurs varient de 1 cm (PK 54) à 73 cm (PK 53). Cette zone comprend neuf épaisseurs mesurées inférieures à 10 cm (PK 54, 52, 49 et 47). La faible épaisseur relevée au PK 49 (6 cm) en décembre 2002 montre qu'il y a un couvert instable à cet endroit, comme mentionné dans le résumé de l'hiver 2002-2003. Il en est de même aux PK 54 et 52 (épaisseurs de 3-5 cm et 2-17 cm) qui sont considérés comme des zones à risque pour l'hiver 2004-2005. De plus faibles épaisseurs interannuelles sont relevées au PK 52 où l'épaisseur minimale mesurée à la fin février est de 58 cm en 2003, comparée à 3 cm en 2004 et 2 cm en 2005.

Dans la zone 5 (PK 45 à 30), 13 épaisseurs ont été mesurées entre les PK 35 et 30 durant le suivi de 2002-2005. Ces épaisseurs varient de 5 cm au PK 35 au cœur de l'hiver 2003-2004 (seule épaisseur mesurée inférieure à 10 cm dans cette zone) à 38 cm au PK 30 à la fin janvier 2004.

Dans la zone 6 (PK 10 à 30), 86 épaisseurs ont été mesurées durant le suivi de 2002-2005 et 62 épaisseurs durant la campagne de 2025.

Les épaisseurs dans la zone 6 varient de 1 cm (PK 26) à 82 cm (PK 10) avec une moyenne de 52 cm durant les mois de février 2002-2005. Comme mentionné dans la synthèse du suivi des glaces, le PK 26 forme une glace mince au début et à la fin de l'hiver 2003-2004 (épaisseurs de 8 et 18 cm) et constitue une zone à risque à l'hiver 2004-2005. Ainsi, les cinq épaisseurs mesurées inférieures à 10 cm dans la zone 6 sont situées au PK 26. Les épaisseurs diminuent d'une année à l'autre à ce chainage où l'épaisseur minimale mesurée à la fin février est de 35 cm en 2003, comparée à 18 cm en 2004 et 23 cm en 2005.

Les épaisseurs de 2025 dans la zone 6 varient de 13 cm (PK 27) à 61 cm (PK 17) avec une moyenne de 29 cm durant le mois de février 2025. Notons qu'aucune épaisseur inférieure à 10 cm n'a été mesurée durant la campagne de 2025, en raison de la glace mince constatée à certains sites où des mesures étaient prévues mais n'ont pas été réalisées pour des raisons de sécurité.

Pour le mois de janvier, de faibles épaisseurs ont été relevées au PK 17 et près du PK 26 pour les deux périodes étudiées. En février, davantage de faibles épaisseurs (<20 cm) sont relevées pour 2025 que pour la période 2002-2005, et ce, entre les PK 17 et 30. En mars 2025, les épaisseurs demeurent faibles entre les PK 25 et 30 ainsi qu'au PK 15. Ainsi, les épaisseurs dans la zone 6 sont

généralement plus élevées pour la période 2002-2005 que pour l'hiver 2025 puisque la moyenne diminue d'environ 24 cm entre les deux périodes, ce qui correspond à une diminution de 45 %.

Pour la zone témoin, 11 épaisseurs ont été mesurées durant les hivers 2002-2005 et quatre épaisseurs ont été relevées en 2025 dans le lac Hingan. Elles varient de 58 à 85 cm avec une moyenne de 73 cm aux mois de février 2002-2005. À l'hiver 2024-2025, ces épaisseurs varient de 45 à 63 cm avec une moyenne de 54 cm en février 2025. Dans la zone témoin, les épaisseurs sont plus élevées pour la période 2002-2005 que pour l'hiver 2025 puisque la moyenne diminue de 19 cm entre les deux périodes, ce qui correspond à une diminution de 26 %.

Une partie de la réduction des épaisseurs de glace dans la zone 6 peut s'expliquer par la clémence de l'hiver 2025 comparé aux hivers 2002-2005. Toutefois, la réduction relative pour les épaisseurs moyennes presque deux fois plus importantes dans la zone 6 que dans la zone témoin s'explique par la différence des débits hivernaux entre la période 2002-2005 et l'hiver 2024-2025. Les débits hivernaux à l'hiver 2024-2025 sont majoritairement au palier à deux groupes (42 % entre décembre et mars), tandis que cette classe de débit n'existe pas pour la période du suivi des glaces de 2002-2005 où le palier maximal utilisé est celui de 10-90 m^3/s pour l'hiver 2005-2006 (87 %) et celui de 90-150 m^3/s pour l'hiver 2004-2005 (58 %), ce qui favorise davantage l'érosion thermique en 2025 comparativement à la période 2002-2005.

Avec les épaisseurs de glace des suivis 2002-2005, quatre valeurs de coefficient B ont été calculées pour l'ensemble de la zone d'étude afin de calibrer la loi de Stefan présentée dans la section 3.4.2. Un coefficient B de 1,81 a été calculé dans la zone 2 et cette valeur est aussi utilisée pour la zone 1, car ces deux zones se trouvent dans le réservoir SM-3. Un coefficient B de 1,40 a été calculé pour la zone 4 et est également utilisé dans les zones 7.1 et 7.2 qui montrent un régime des glaces davantage similaire à celui de la zone 4 qu'aux autres zones. Des coefficients B de 1,28 et 1,71 ont été calculés respectivement pour les zones 5 et 6.

Avec les données de 2025, un coefficient B a pu être calculé pour la zone 6. Celui-ci est d'une valeur de 1,25. Ce coefficient nettement inférieur à celui obtenu avec les mesures d'épaisseur de 2002-2005 s'explique en partie par l'augmentation des débits sortant de la centrale SM-3. En effet, la capacité de la centrale est passée de 150 m^3/s à 300 m^3/s entre les deux campagnes de mesures avec la mise en service du second groupe en 2007. Il est donc nécessaire de revoir les coefficients B à la baisse pour l'ensemble des zones en aval de la centrale SM-3 pour la période récente.

La valeur minimale de la série (B = 0,53) a été utilisée pour la zone 4 en raison des pointes de débit et des températures de l'eau au-dessus du point de congélation en hiver qui favorisent l'érosion thermique à cet endroit. La zone 5 utilise la valeur moyenne entre les zones 4 et 6 (B = 0,89). Cette valeur a également été utilisée pour les zones 7.1 et 7.2 puisque le couvert y est plus instable que dans la zone 6, mais que les températures de l'eau et les débits y sont moins élevés que dans la zone 4 qui reçoit le débit sortant de la centrale SM-3. Dans le réservoir de SM-3, la valeur obtenue à l'aide des mesures d'épaisseurs de 2002-2005 pour les zones 1 et 2

(B = 1,81) est conservée puisque l'augmentation du débit issu de la centrale de SM-3 n'affecte pas les épaisseurs de glace dans le réservoir de SM-3.

Afin de refléter la variation du régime des glaces entre les hivers avant et après 2007, différents coefficients B sont utilisés entre ces deux périodes. Ainsi, les coefficients calculés à l'aide des épaisseurs mesurées entre 2002 et 2005 sont utilisés pour les hivers 2002-2006 et ceux calculés avec les données de 2025 sont utilisés pour les hivers plus récents. Ces valeurs sont résumées au Tableau 6.1.

Tableau 6.1 Coefficient B pour chaque zone

Section	Coefficient B	
	2004-2006	2006-2025
Zone 1 (PK 135-105)	1,81	1,81
Zone 2 (PK 105-85)	1,81	1,81
Zone 4 (PK 60 à 45)	1,40	0,53
Zone 5 (PK 45 à 30)	1,28	0,89
Zone 6 (PK 30 à 10)	1,71	1,25
Zone 7.1 (PK 10 à 7)	1,40	0,89
Zone 7.2 (PK 7 à 0)	1,40	0,89

6.4 Utilisation du couvert de glace

Un rapport sectoriel sur le milieu humain allochtone a été produit en 2025 (WSP, 2025). Il inclut un chapitre sur l'utilisation du couvert de glace par les motoneigistes qui est résumé ci-après.

Cinquante motoneigistes circulant dans la zone d'étude ont répondu au sondage. Ils y circulent généralement 25 fois ou moins par hiver.

Vingt répondants circulent dans le secteur du réservoir de SM-3, dont 17 directement sur le réservoir. Douze répondants circulent dans le secteur en amont et en aval de la centrale SM-3, dont sept directement sur le réservoir. Les problèmes rapportés dans ces zones sont en lien avec la neige fondante, le long délai de formation de la glace, l'état du couvert de glace (variation du niveau d'eau, accumulation ou couvert mince), l'épaisseur du couvert et la présence de saillies.

Trente répondants circulent dans le secteur du réservoir de SM-2, dont 29 directement sur le réservoir. Des problèmes sont signalés sur le réservoir de SM-2 pour une proportion de répondants deux fois plus grande que pour le réservoir de SM-3. Les problèmes rapportés dans cette zone sont en lien avec l'accumulation de glace et la présence de fissures, de neige fondante (« slush ») et de murs de glaces le long des berges, l'accès difficile au réservoir, la présence d'eau sur la glace ainsi que l'absence, le manque ou l'amincissement du couvert de glace.

Douze répondants circulent à l'aval du barrage de SM-2, mais seulement sur les sentiers fédérés servant à la randonnée.

7 ANALYSE DU RÉGIME DES GLACES ACTUEL

Rappelons que la mise en marche du second groupe de la centrale SM-3 a eu lieu à l'hiver 2006-2007 (section 5.1). Ainsi, les statistiques sur les différents paramètres servant à caractériser le régime des glaces excluent les hivers antérieurs à celui de 2006-2007 afin d'éviter de confondre deux dynamiques glaciologiques distinctes.

7.1 Réservoir SM-3

7.1.1 Dynamique glaciologique et hiver moyen

Pour la zone 1, la Figure 7.1 montre les dates de prise et de départ des glaces et la Figure 7.3 présente la durée totale de présence de la couverture de glace. La Figure 7.2 montre quant à elle les degrés-jours de gel à la prise et les degrés-jours de dégel au départ des glaces.

Pour la zone 2, la Figure 7.4 montre les dates de prise et de départ des glaces et la Figure 7.6 présente la durée totale de présence de la couverture de glace. La Figure 7.5 montre quant à elle les degrés-jours de gel à la prise et les degrés-jours de dégel au départ des glaces.

Les zones 1 et 2 partagent le même régime des glaces. La prise des glaces y a lieu en moyenne le 22 décembre à 290 degrés-jours de gel (écart-type [ET] = 55). Cette date est environ un mois et demi après le début de l'hiver glaciologique à cause de la température de cette grande masse d'eau qui prend un certain temps à refroidir pour atteindre l'isothermie automnale (4 °C) avant de pouvoir refroidir la surface au point de congélation pour former le couvert de glace. Un seul événement de formation de glace survient annuellement dans ces zones, et ce, durant une période de 144 jours (ET = 14). Le départ a lieu après la fin de l'hiver glaciologique, en moyenne un mois plus tard (ET = 8 jours), soit à la mi-mai, à 137 degrés-jours de dégel (ET = 31).

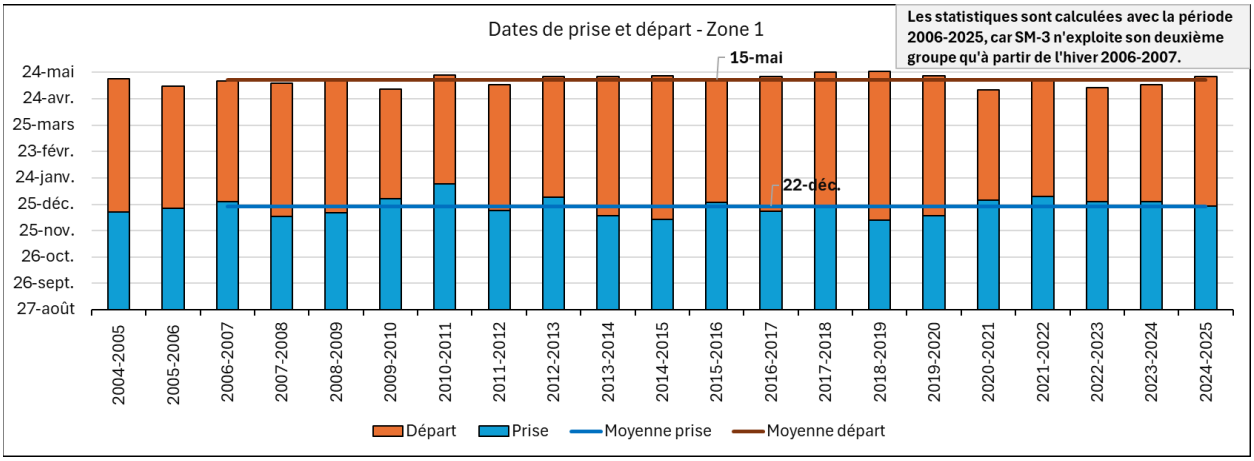


Figure 7.1 Dates de prise et de départ – Zone 1

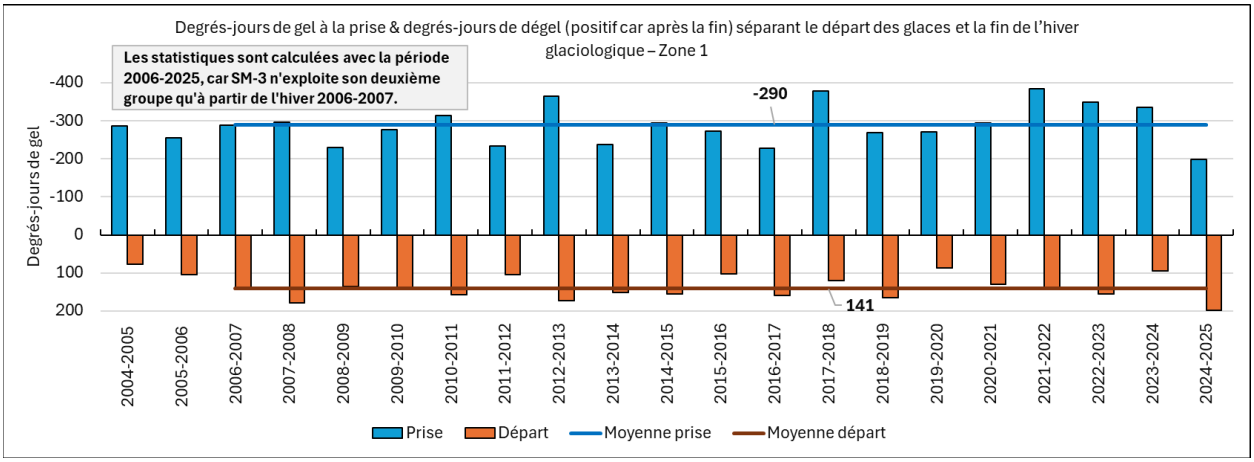


Figure 7.2 Degrés-jours de gel à la prise & degrés-jours de dégel au départ – Zone 1

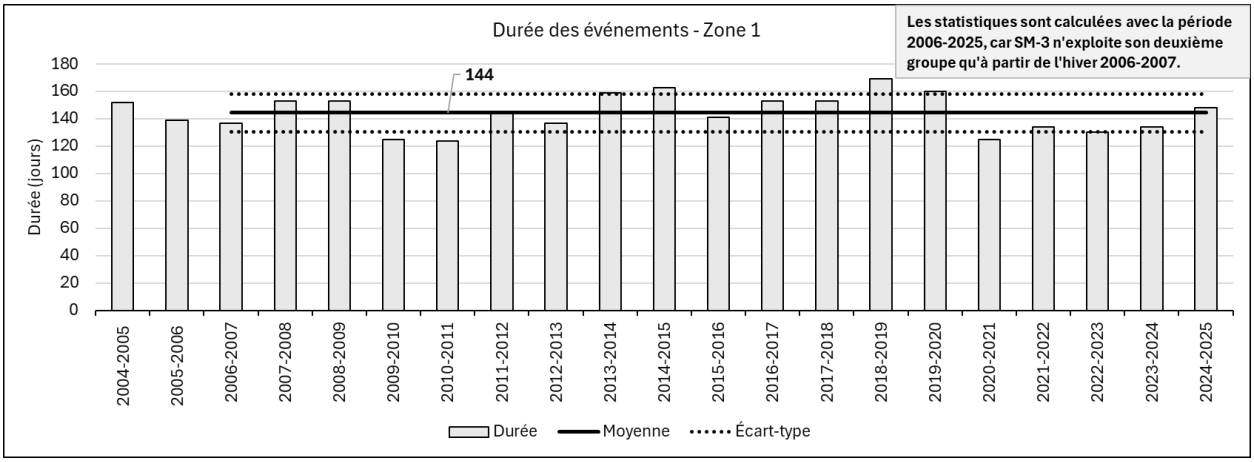


Figure 7.3 Durée de l'ensemble des événements de glace – Zone 1

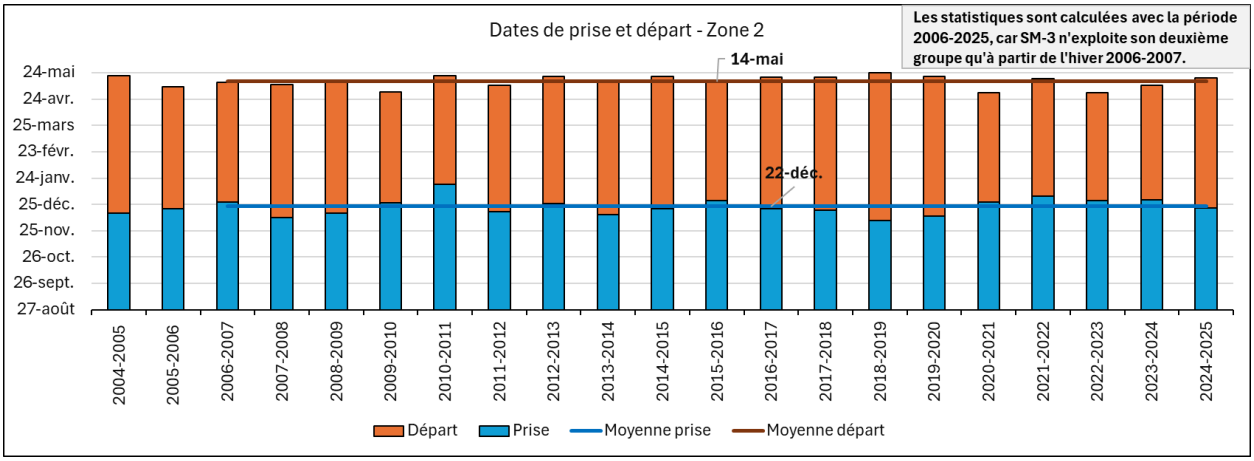


Figure 7.4 Dates de prise et de départ – Zone 2

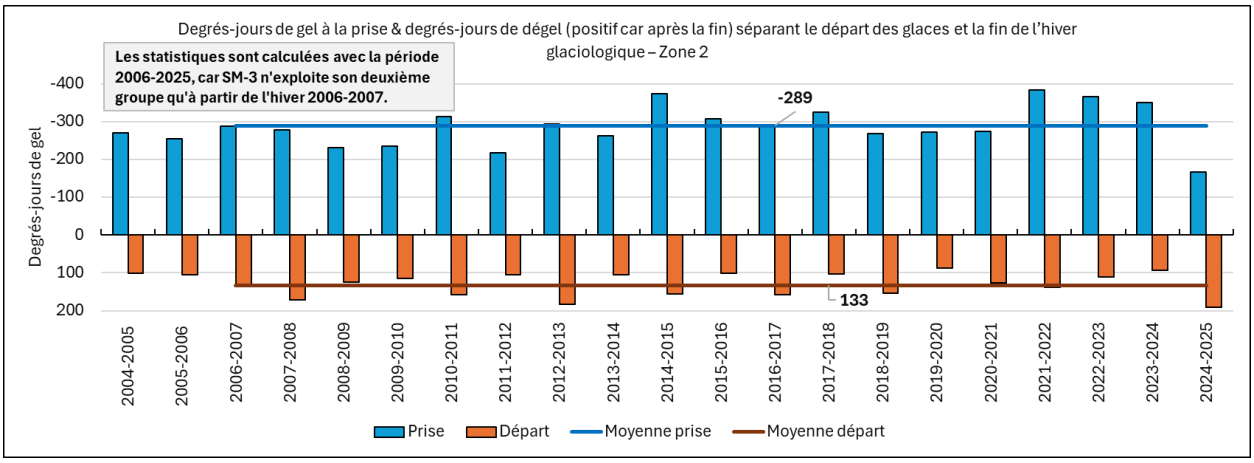


Figure 7.5 Degrés-jours de gel à la prise & degrés-jours de dégel au départ – Zone 2

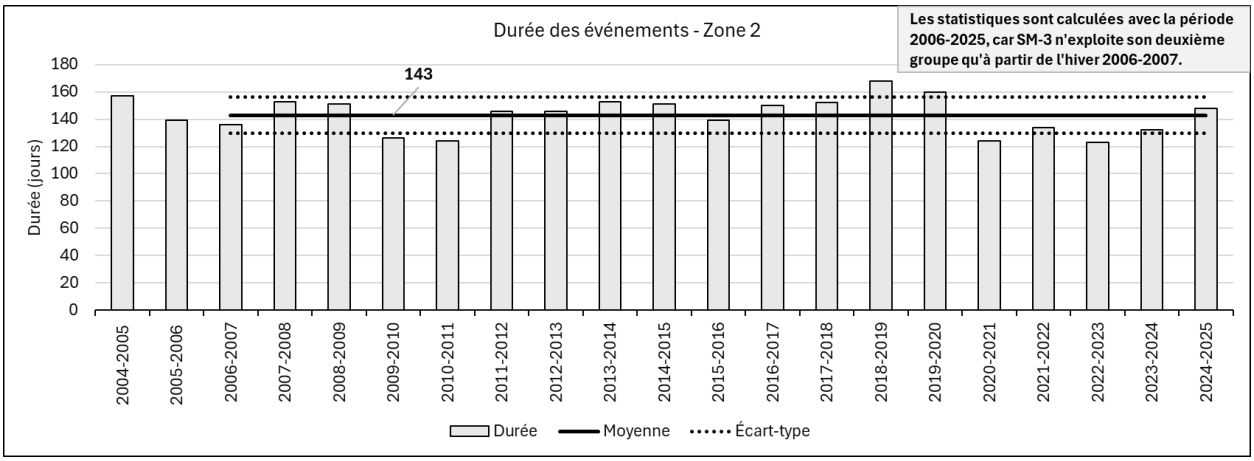


Figure 7.6 Durée de l'ensemble des événements de glace – Zone 2

7.1.2 Épaisseur du couvert de glace

Pour la zone 1, la Figure 7.7 montre les degrés-jours de gel effectifs de chaque événement de glace et la Figure 7.8 montre les épaisseurs de glace associées.

Pour la zone 2, la Figure 7.9 montre les degrés-jours de gel effectifs de chaque événement de glace et la Figure 7.10 montre les épaisseurs de glace associées.

Un seul événement de formation du couvert de glace survient annuellement dans le réservoir de SM-3. Celui-ci a lieu à un cumul moyen de 1 234 degrés-jours de gel effectifs (ET = 300), ce qui génère une glace de 63 cm d'épaisseur en moyenne (ET = 8). Les épaisseurs de glace estimées pour les zones 1 et 2 varient de 45 à 76 cm en fin d'hiver.

Durant la campagne terrain de 2002 à 2005, huit épaisseurs de glace ont été mesurées dans le réservoir de SM-3 au PK 92. Une épaisseur de 66 cm y a été relevée en fin d'hiver. La valeur

maximale relevée durant la campagne concorde bien avec la gamme des épaisseurs de fin d'hiver estimée pour toutes les années analysées.

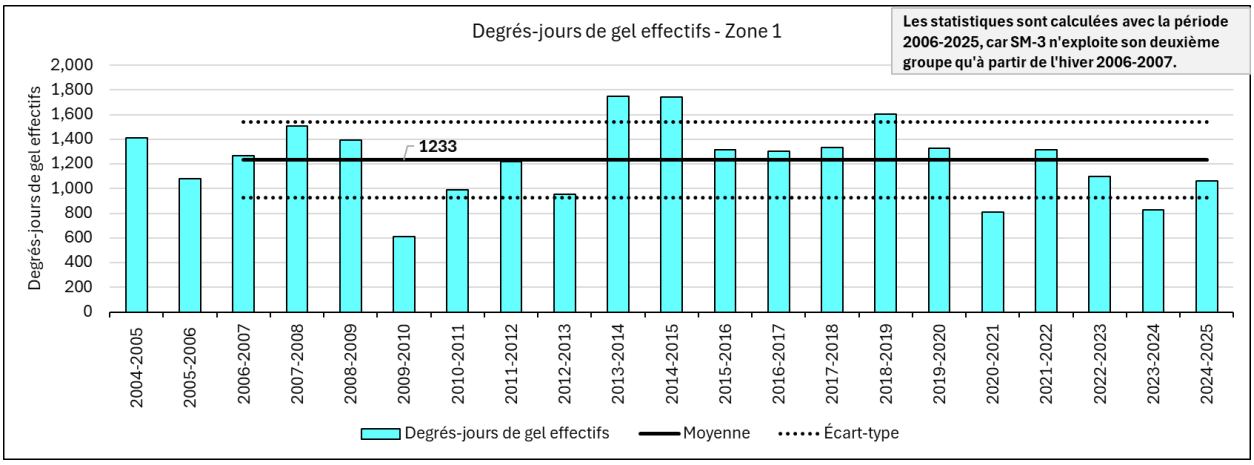


Figure 7.7 Degrés-jours de gel effectifs – Zone 1

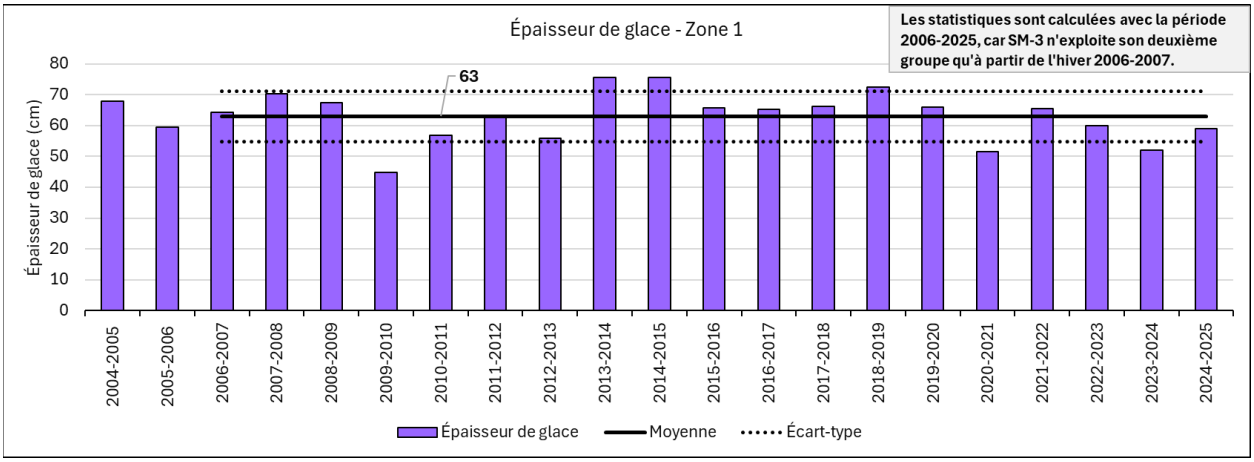


Figure 7.8 Épaisseurs de glace – Zone 1

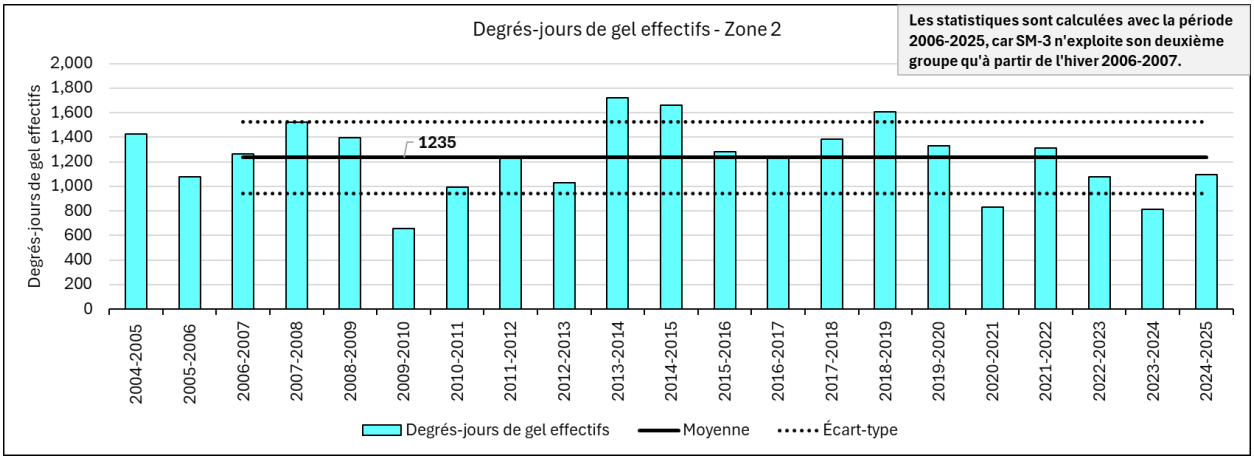


Figure 7.9 Degrés-jours de gel effectifs – Zone 2

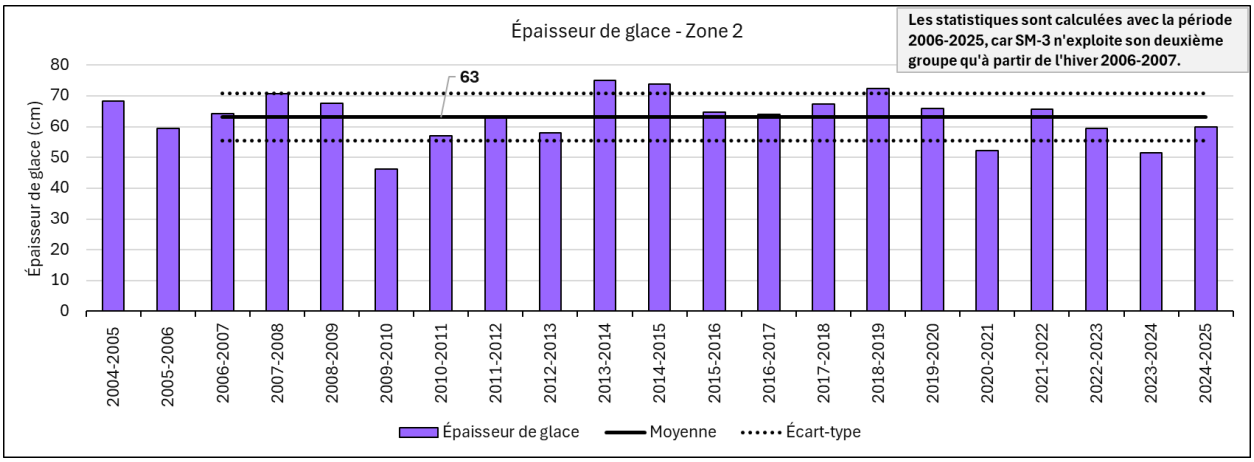


Figure 7.10 Épaisseurs de glace – Zone 2

7.1.3 Conditions de glace le long des rives

L'abaissement du niveau d'eau dans le réservoir de SM-3 en hiver cause le bris du couvert sur une distance définie par la pente de la berge et l'importance de la variation du niveau d'eau. D'après la méthodologie décrite dans la section 3.4.4, la bande riveraine de glace morcelée à cause du marnage mesure approximativement 15 m puisque la glace possède une épaisseur moyenne de l'ordre de 65 cm en fin d'hiver et la pente des rives varie de 0,15 à 1,02 m/m dans le réservoir.

À l'aide de ces pentes et de la longueur de la bande riveraine de glace morcelée en fin d'hiver, la largeur totale du champ de glace morcelé peut être calculée pour le marnage moyen historique. Pour ce marnage de 5,6 m, la largeur du champ de glace morcelé en fin d'hiver varie de 20 à 41 m avec une moyenne de 27 m pour la rive droite et de 22 à 52 m avec une moyenne de 32 m pour la rive gauche.

Ainsi, la variation du niveau d'eau dans le réservoir de SM-3 au cours de l'hiver cause un morcèlement du couvert de glace à partir de la rive sur une distance horizontale moyenne d'une trentaine de mètres. De plus, la fissuration successive de la glace le long des rives permet aussi à l'eau de remonter en surface en former des étendues de « slush » tel que décrit dans la section 3.4.4.

7.1.4 Accès au couvert de glace

La Figure 7.11 et la Figure 7.12 présentent les périodes possédant l'épaisseur minimum requise pour l'accès sécuritaire au couvert de glace pour les zones 1 et 2.

Cette période varie de 67 à 118 jours annuellement avec une moyenne de 94 jours (ET = 16) pour les deux zones. Rappelons que l'utilisation du couvert de glace dépend aussi de l'accès en rive. L'impact sur les utilisateurs d'une bande de glace morcelée d'une trentaine de mètres le long des rives et la présence de « slush » n'a pas été étudié dans la présente analyse, mais des difficultés d'accès au couvert ont bien été rapportées par les utilisateurs. Celles-ci incluent la présence de

neige fondante et de saillies (section 6.4). En somme, l'accès au couvert de glace est possible avec certaines difficultés d'accès en rives.

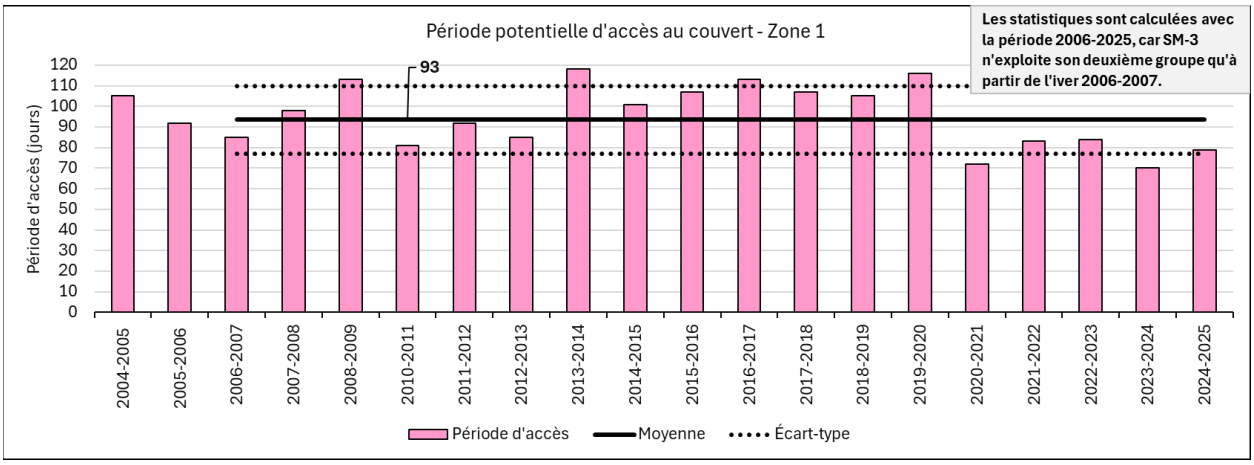


Figure 7.11 Période potentielle d'accès au couvert de glace – Zone 1

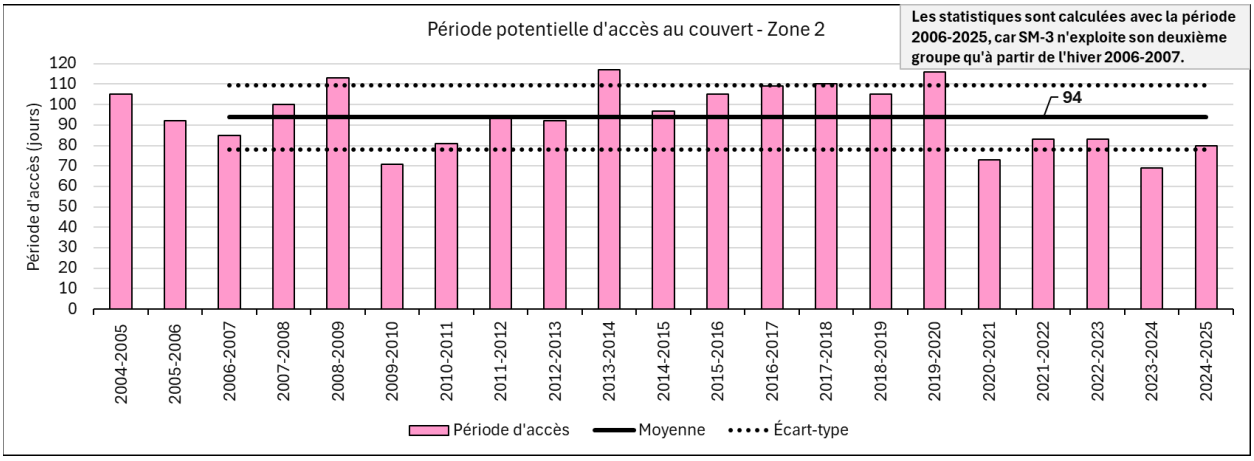


Figure 7.12 Période potentielle d'accès au couvert de glace – Zone 2

7.2 Tronçon entre les centrales SM-3 et SM-2

7.2.1 Dynamique glaciologique et hiver moyen

Une couverture de glace sur une grande étendue a été aperçue dans la zone 3 durant 7 des 21 années étudiées à l'aide des images satellitaires. Une seule image avec couvert de glace complet a été observée à cet endroit pour les hivers 2013-2014, 2016-2017, 2022-2023 et 2023-2024, et ce, sur l'ensemble du tronçon. Entre quatre et cinq images avec couvert de glace partiel et sporadique y ont été observées pour les hivers 2015-2016 (maximum deux jours consécutifs), 2017-2018 (9 jours) et 2019-2020 (4 jours). Le Tableau 7.1 présente les caractéristiques des moments où un couvert de glace significatif a été observé dans la zone 3.

Durant ces événements, le débit sortant de SM-3 est généralement nul ou faible (un groupe utilisé), ce qui engendre un faible débit au PK 75 avec une valeur maximale de 159 m^3/s pour les événements de gel étudiés dans la zone 3. De plus, les températures de l'air sont généralement inférieures à la valeur moyenne de -8,89 °C pour l'hiver glaciologique, avec une moyenne de -12,60 °C durant ces événements. Ainsi, les faibles débits conduisant à de faibles vitesses combinées à des températures de l'air très froides permettent à certains courts tronçons de geler dans ce secteur. De plus, les apports hydrologiques intermédiaires avec une température de l'eau à 0 °C tout l'hiver deviennent plus significatifs en proportion à faible débit, ce qui refroidit l'eau issue de SM-3 et facilite ainsi la formation de glace.

Aucune épaisseur de glace n'a été mesurée dans la zone 3 durant les campagnes terrain de 2002 à 2005 et de 2025, parce que le couvert de glace y est trop instable et donc inaccessible.

Tableau 7.1 Caractéristiques des moments avec couvert de glace dans la zone 3

Hiver	Date	Débit au PK 75* (m^3/s)	Niveau d'eau au PK 75 (m)	Température de l'eau moyenne à SM-3** (°C)	Température de l'air à Sept-Îles (°C)	Localisation de la glace (PK)
2013-2014	13-jan.	2	68,28	1,83	-6,30	60 - 76,5
2015-2016	03-jan.	2	68,34	1,77	-19,20	60 - 76,5
	04-jan.	159	68,37	1,88	-19,90	60 - 63,5
	12-jan.	120	69,35	1,78	-16,50	60 - 65
	05-fév.	43	68,32	1,41	-15,90	60 - 63,5
	08-mars	2	68,31	2,02	-11,70	60 - 76,5
2016-2017	29-jan.	4	68,49	1,93	-7,30	62 - 76,5
2017-2018	17-fév.	3	68,38	2,07	-17,70	60 - 76,5
	18-fév.	3	68,38	2,02	-12,00	60 - 76,5
	24-fév.	42	69,46	2,05	-12,70	60 - 65
	25-fév.	43	69,47	2,03	-16,90	60 - 76,5
2019-2020	26-déc.	62	68,42	2,06	-14,80	60 - 65
	29-déc.	3	68,39	1,87	-9,30	60 - 65
	25-jan.	103	68,44	2,10	-12,30	62 - 63
	05-mars	2	68,32	1,93	-5,60	60 - 76,5
	18-mars	2	68,34	2,04	-11,60	62,5 - 76,5
2022-2023	22-déc.	4	68,43	2,54	-12,00	61,5 - 76,5
2023-2024	02-jan.	79	68,56	1,73	-5,10	60 - 65

*Moyenne des débits horaires pour la journée.
**Température moyenne quotidienne pour la période 2006-2012, car nous n'avons pas de données après 2012.

Pour la zone 4, la Figure 7.13 montre les dates de prise et de départ des glaces et la Figure 7.15 présente la durée globale annuelle des événements de glace. La Figure 7.14 montre quant à elle les degrés-jours de gel à la prise et les degrés-jours de dégel au départ ou les degrés-jours de gel séparant le départ des glaces de la fin de l'hiver glaciologique.

Pour la zone 5, la Figure 7.16 montre les dates de prise et de départ des glaces et la Figure 7.18 présente la durée globale annuelle des événements de glace. La Figure 7.17 montre quant à elle les degrés-jours de gel à la prise et les degrés-jours de dégel au départ ou les degrés-jours de gel séparant le départ des glaces de la fin de l'hiver glaciologique.

Pour la zone 6, la Figure 7.19 montre les dates de prise et de départ des glaces et la Figure 7.21 présente la durée globale annuelle des événements de glace. La Figure 7.20 montre quant à elle les degrés-jours de gel à la prise et les degrés-jours de dégel au départ des glaces.

Le régime des glaces de la zone 4, dans la partie amont du réservoir de SM-2, est assez différent de celui des zones 5 et 6. La prise des glaces y a lieu en moyenne le 18 décembre à 220 degrés-jours de gel (ET = 123). Entre zéro et trois événements de formation et départ du couvert de glace peuvent avoir lieu dans un même hiver et, des 19 dernières années, seulement 42 % ont connu un événement de glace unique. Pour ce qui est des deux années sans couvert de glace (2020-2021 et 2024-2025), elles peuvent s'expliquer par la clémence de l'hiver puisqu'ils sont tous deux parmi les cinq hivers les plus cléments de la série étudiée et comportent des périodes de redoux importantes. La zone 4 totalise en moyenne 65 jours avec présence de couvert de glace (ET = 35). Le départ a lieu en moyenne 31 jours (ET = 17) avant la fin de l'hiver glaciologique, soit à la mi-mars, 142 degrés-jours de gel avant que la fin de l'hiver glaciologique n'ait lieu (ET = 152).

Bien que la zone 5 possède des similarités avec la zone 4, elle en partage davantage avec la zone 6. Dans les zones 5 et 6, la prise des glaces survient au début du mois de décembre (en moyenne les 7 et 4 décembre, respectivement), à 118 degrés-jours de gel dans la zone 5 (ET = 66) et à 100 degrés-jours de gel dans la zone 6 (ET = 33). Entre un et deux événements de formation de glace ont lieu annuellement, la majorité des années étant caractérisées par un événement unique. Les zones 5 et 6 totalisent respectivement en moyenne 122 et 152 jours avec couvert de glace annuellement (ET = 31 et 8). Dans la zone 5, le départ a généralement lieu après la fin de l'hiver glaciologique (82 % des 19 dernières années où la date de départ est connue), à la mi-avril, à 3 degrés-jours de dégel (ET = 27). Dans la zone 6, le départ a lieu après la fin de l'hiver glaciologique pour les 19 dernières années, au début mai, à 59 degrés-jours de dégel (ET = 14).

Les événements de formation et départ de glace multiples ont lieu principalement dans la zone 4 où ils touchent 58 % des 19 dernières années. Ils sont plus rares dans les zones 5 (21 %) et 6 (un seul hiver). Les départs hâtifs sont la cause principale des événements multiples, après quoi un couvert de glace se reforme.

Les redoux hivernaux et le rayonnement solaire ne semblent pas être les causes principales de ces départs hâtifs dans la zone 4 puisque des 10 événements répertoriés, seuls trois ont lieu durant

un redoux (2009-2010, 2021-2022 et 2022-2023) et deux présentent un couvert de glace sans neige à ce moment (2019-2020 et 2021-2022). Un fort débit semble être la cause la plus fréquente des départs hâtifs car pour 7 des 10 événements, deux groupes sont en marche à SM-3. De plus, le débit moyen à SM-3 lors de ces départs est de 193 m^3/s. Ainsi, contrairement aux autres secteurs du réservoir de SM-2, les départs hâtifs dans la zone 4 ont lieu lors de périodes de froid où le débit turbiné augmente plutôt que lors de périodes de redoux.

Des quatre départs hâtifs de la zone 5, deux peuvent s'expliquer principalement par un redoux hivernal important, et ce, lors de deux des hivers les plus cléments de la série (2009-2010 et 2024-2025). Les deux autres départs hâtifs semblent être causés par la faible épaisseur de la glace formée puisque le départ a lieu seulement 7 jours après la prise pour 2018-2019 et 10 jours après la prise pour 2021-2022, ce dernier événement connaissant un redoux au même moment.

Le seul départ hâtif de la zone 6 semble causé par un redoux hivernal lors du troisième hiver le plus clément de la série étudiée (2023-2024).

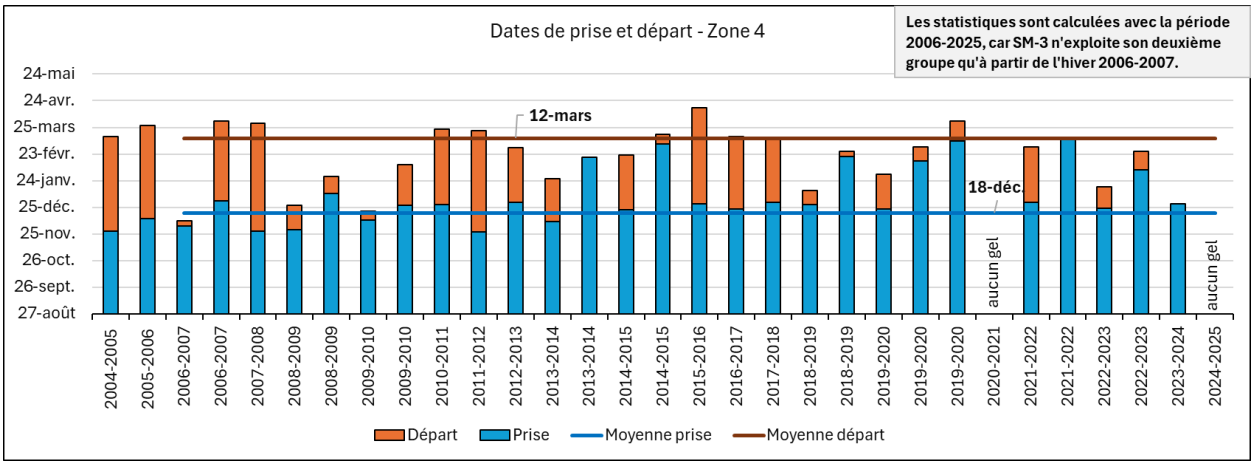


Figure 7.13 Dates de prise et de départ – Zone 4

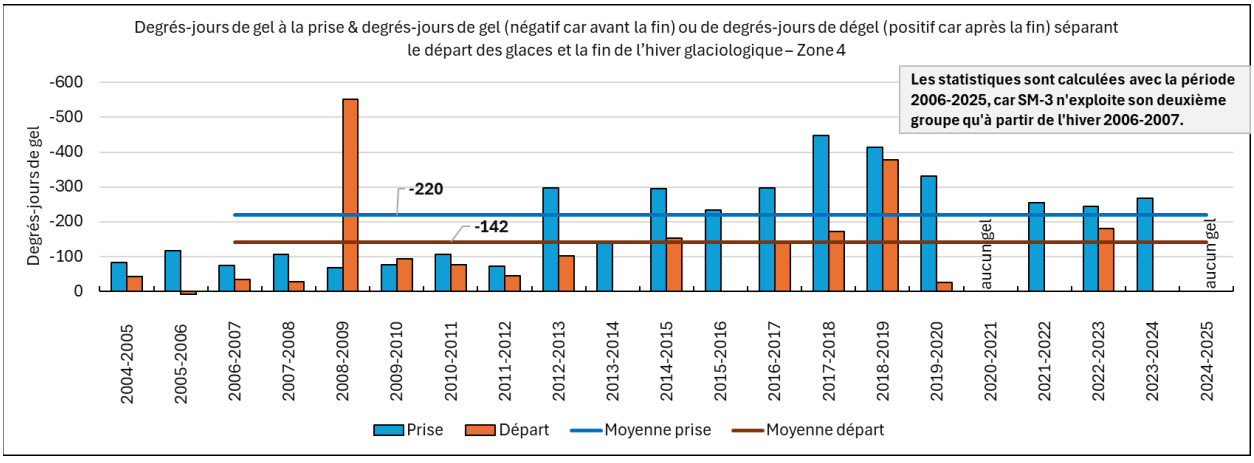


Figure 7.14 Degrés-jours de gel à la prise & degrés-jours de dégel au départ ou degrés-jours de gel séparant le départ des glaces et la fin de l'hiver glaciologique – Zone 4

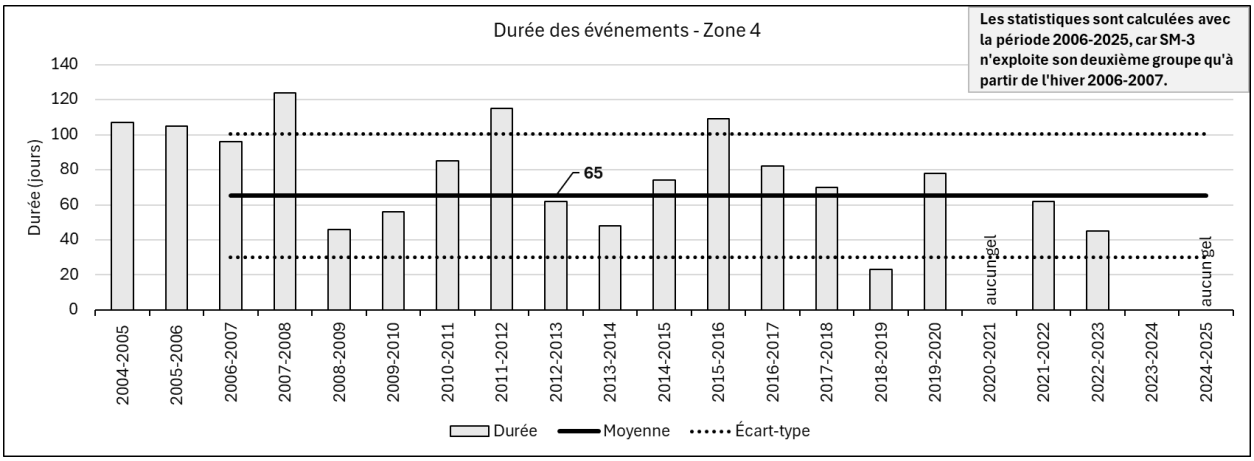


Figure 7.15 Durée de l'ensemble des événements de glace – Zone 4

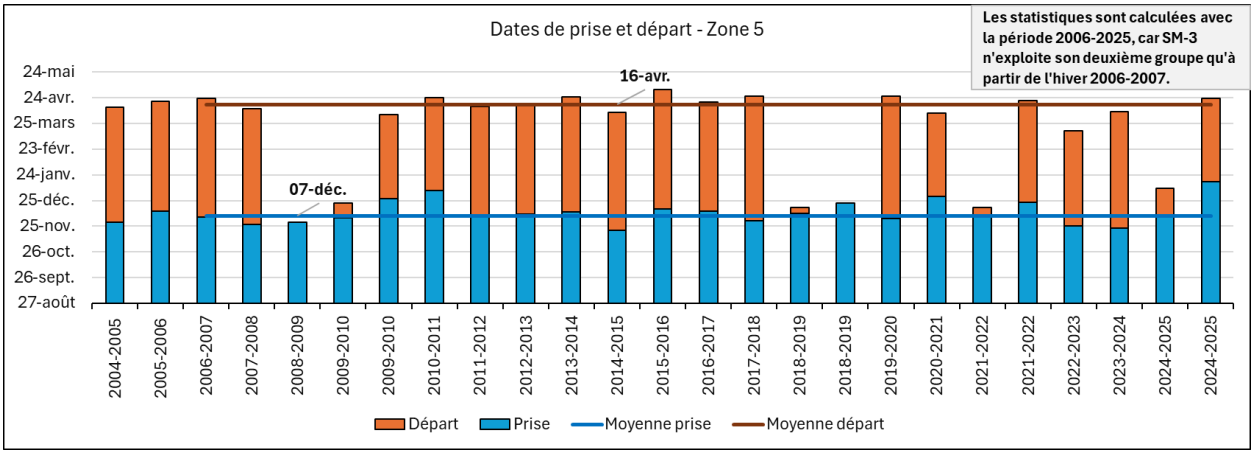


Figure 7.16 Dates de prise et de départ – Zone 5

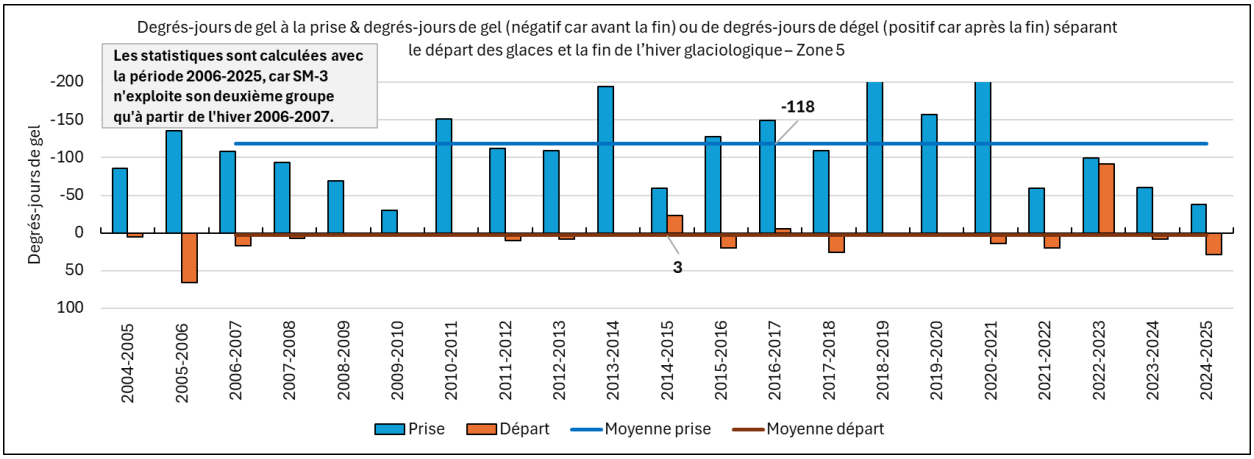


Figure 7.17 Degrés-jours de gel à la prise & degrés-jours de dégel au départ ou degrés-jours de gel séparant le départ des glaces et la fin de l'hiver glaciologique – Zone 5

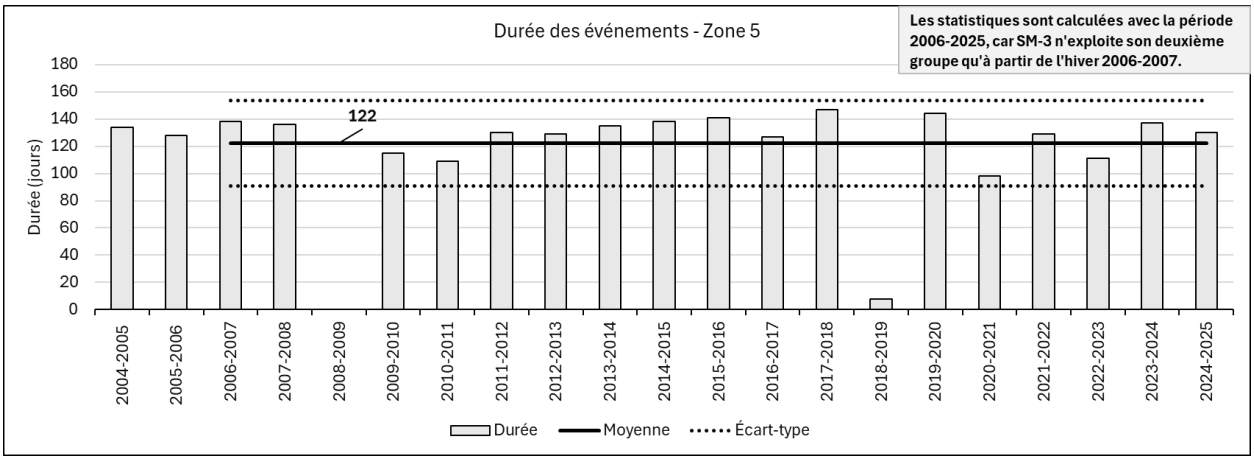


Figure 7.18 Durée de l'ensemble des événements de glace – Zone 5

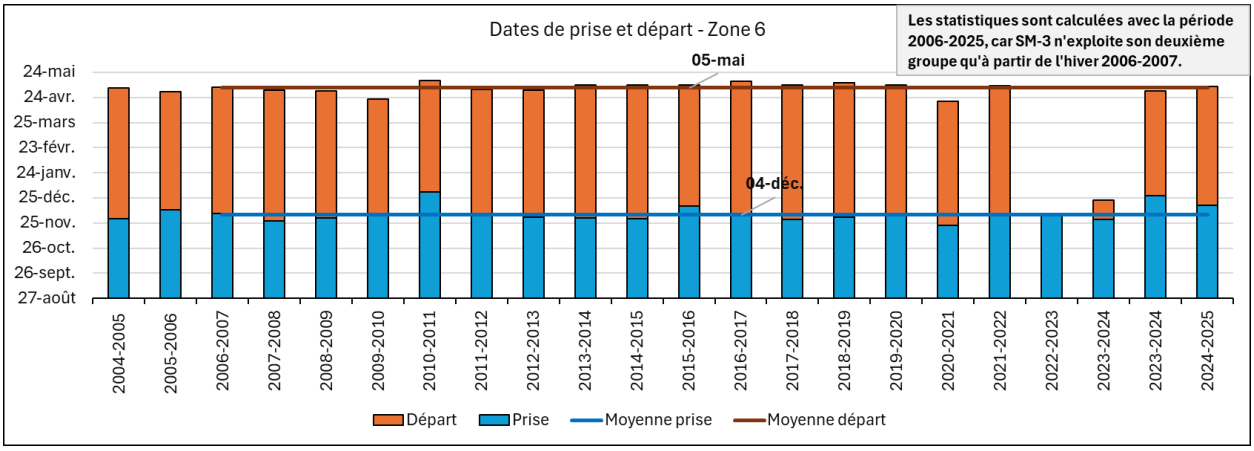


Figure 7.19 Dates de prise et de départ – Zone 6

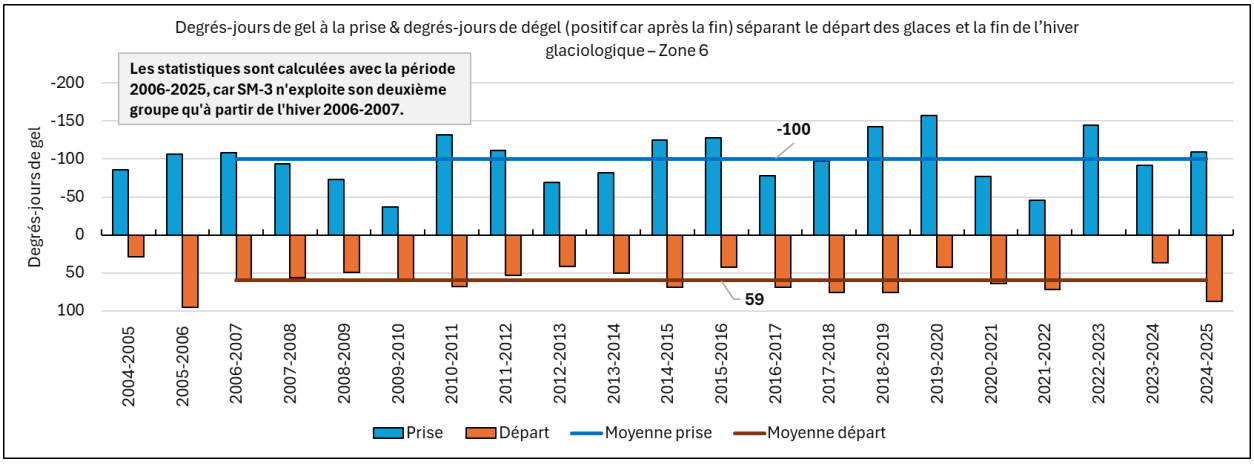


Figure 7.20 Degrés-jours de gel à la prise & degrés-jours de dégel au départ – Zone 6

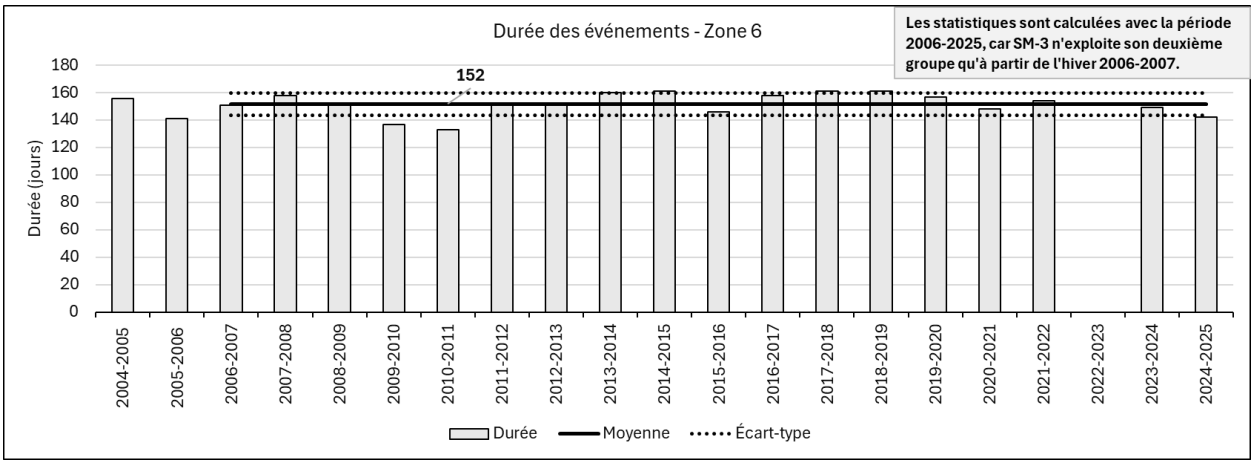


Figure 7.21 Durée de l'ensemble des événements de glace – Zone 6

7.2.2 Épaisseur du couvert de glace

Pour la zone 4, la Figure 7.22 montre les degrés-jours de gel effectifs de chaque événement de glace et la Figure 7.23 montre les épaisseurs de glace associées.

Pour la zone 5, la Figure 7.24 montre les degrés-jours de gel effectifs de chaque événement de glace et la Figure 7.25 montre les épaisseurs de glace associées.

Pour la zone 6, la Figure 7.26 montre les degrés-jours de gel effectifs de chaque événement de glace et la Figure 7.27 montre les épaisseurs de glace associées.

La zone 4 cumule en moyenne à 742 degrés-jours de gel effectifs (ET = 453) pour la génération de glace, ce qui permet de former un couvert d'une épaisseur moyenne de 13 cm en fin d'hiver (ET = 6). Les épaisseurs de glace maximales annuelles estimées pour la zone 4 varient de 0 à 21 cm.

La zone 5 cumule en moyenne à 1 126 degrés-jours de gel effectifs (ET = 414) pour la génération de glace, ce qui permet de former un couvert d'une épaisseur moyenne de 29 cm (ET = 7) en fin d'hiver. Les épaisseurs de glace maximales annuelles estimées pour la zone 5 varient de 7 à 37 cm.

La zone 6 cumule en moyenne à 1 264 degrés-jours de gel effectifs (ET = 311) pour la génération de glace, ce qui permet de former un couvert d'une épaisseur moyenne de 44 cm (ET = 6) en fin d'hiver. Les épaisseurs de glace maximales annuelles estimées pour la zone 6 varient de 32 à 52 cm.

Durant le suivi des glaces réalisé par Hydro-Québec pour les hivers 2002-2005, 38 épaisseurs de glace ont été mesurées dans la zone 4. Pour les zones 5 et 6, respectivement 13 et 86 épaisseurs de glace ont été relevées en 2002-2005. Durant la campagne de 2025, 62 épaisseurs ont été mesurées dans la zone 6, les autres zones n'ayant pas été sondées.

Dans la zone 4, les mesures d'épaisseur relevées en 2002-2005 sont en moyenne de 47 cm à la fin de l'hiver, soit durant la fin du mois de février. Cette valeur concorde avec la valeur moyenne calculée de 50 cm pour la période 2002-2005.

Dans la zone 5, la mesure d'épaisseur relevée à la fin de l'hiver 2005 est de 30 cm (seule mesure après le 20 février pour cette zone), ce qui se rapproche de la valeur minimale calculée à 43 cm pour la série 2002-2005 en demeurant conservateur.

Dans la zone 6, la valeur maximale de fin d'hiver de 82 cm se rapproche de la valeur maximale calculée à 70 cm pour la même période pour 2002-2005. Pour 2006-2025, la valeur moyenne des épaisseurs de fin d'hiver est de 34 cm, ce qui est assez similaire à la valeur moyenne calculée à 44 cm pour la même période.

Rappelons que les épaisseurs inférieures à 10 cm indiquent qu'il existe des faiblesses dans le couvert de glace au cœur de l'hiver dans les secteurs 4, 5 et 6 même si le couvert de glace formé y est stable dans son ensemble, tel que montré à la section 7.2.1, et que l'épaisseur de glace moyenne est plus élevée. Ces faiblesses indiquent la possibilité de la présence de chenaux où les vitesses de l'écoulement se concentrent et augmentent ainsi localement l'érosion thermique.

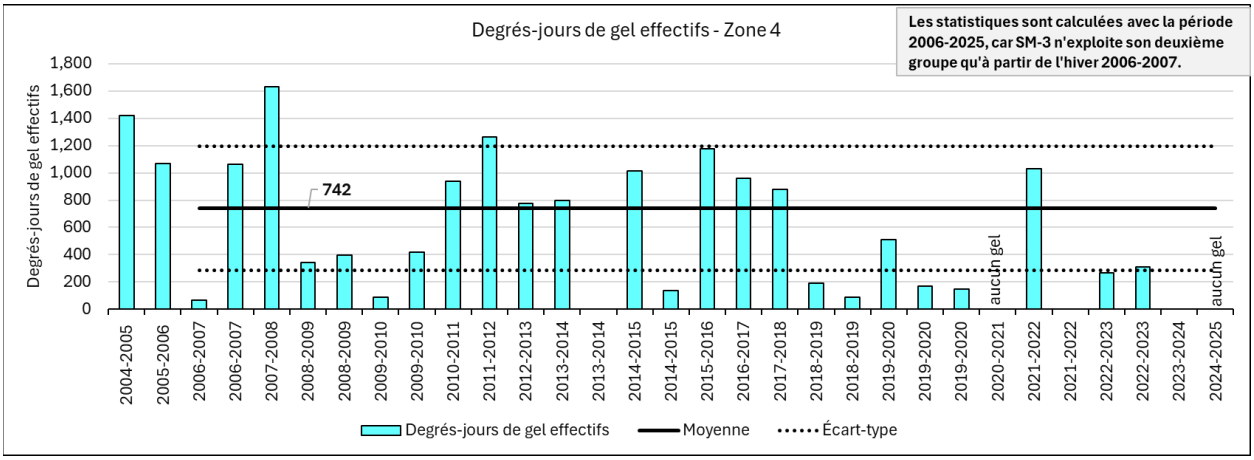


Figure 7.22 Degrés-jours de gel effectifs – Zone 4

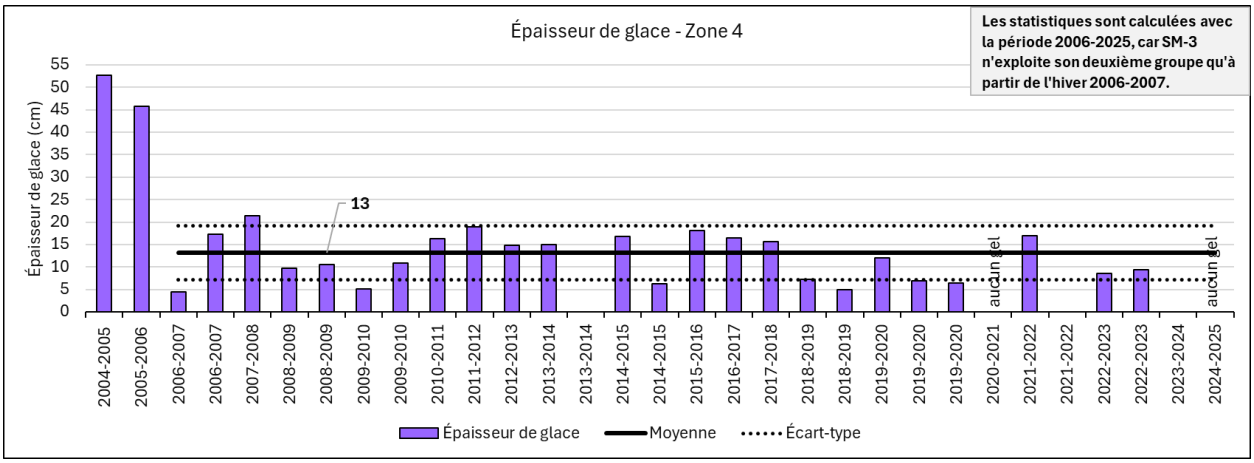


Figure 7.23 Épaisseurs de glace – Zone 4

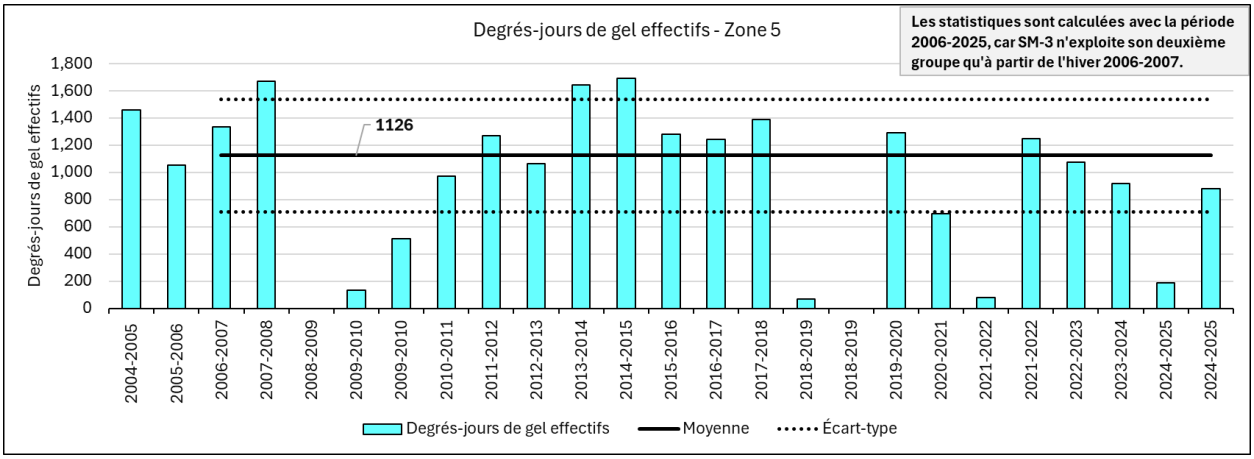


Figure 7.24 Degrés-jours de gel effectifs – Zone 5

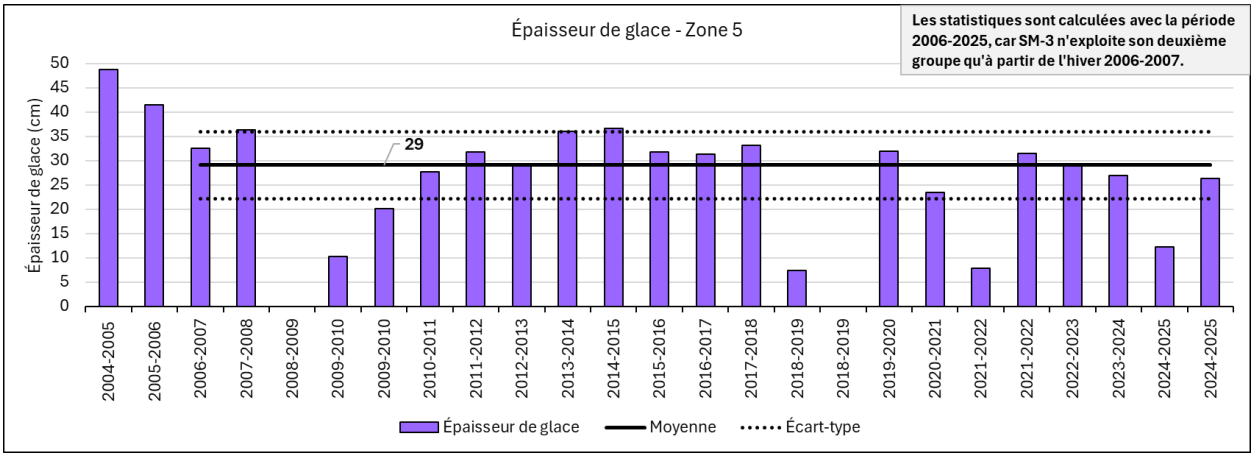


Figure 7.25 Épaisseurs de glace – Zone 5

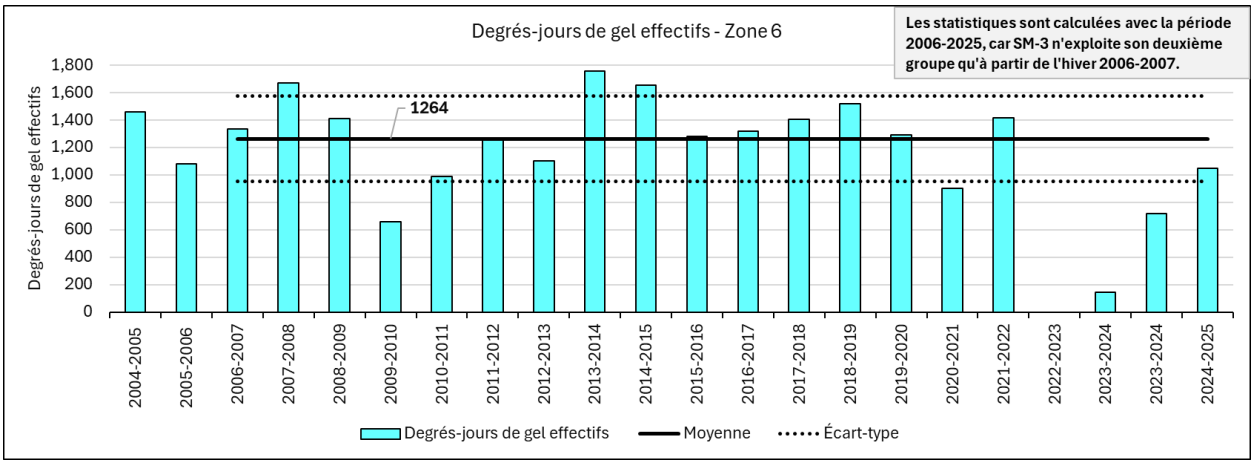


Figure 7.26 Degrés-jours de gel effectifs – Zone 6

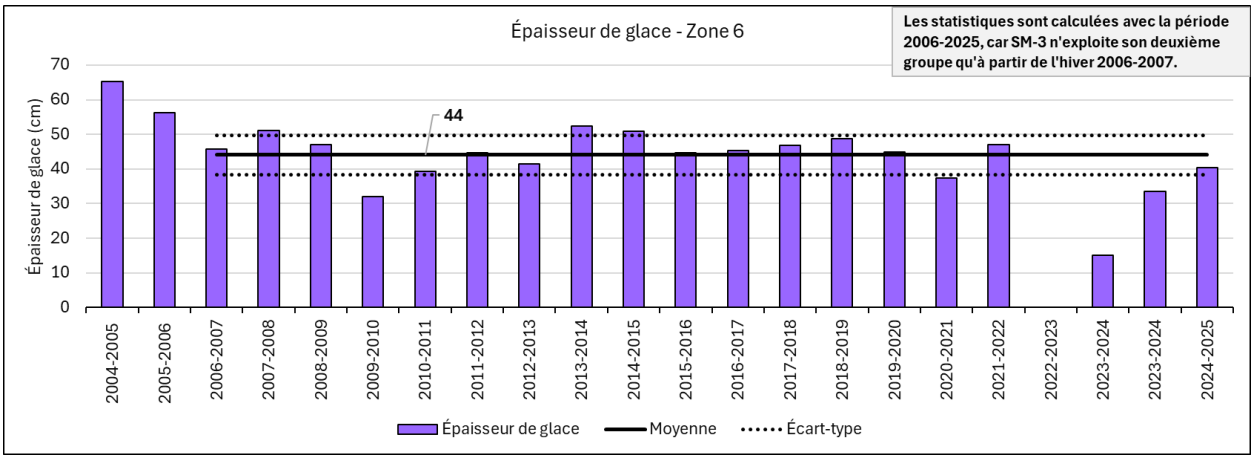


Figure 7.27 Épaisseurs de glace – Zone 6

7.2.3 Bord frontal

Afin d'étudier la progression de la glace au courant de l'hiver sur le long tronçon entre SM-3 et SM-2, la Figure 7.28 montre l'évolution du bord frontal d'un couvert complet (de rive en rive) et la Figure 7.29 montre l'évolution du bord frontal au couvert partiel (comportant des ouvertures). Ces deux figures excluent les données des hivers 2009-2010 et 2020-2021 puisque leurs bords frontaux se comportent différemment en raison de la clémence de ces deux hivers qui sont les moins rigoureux de la série étudiée.

La progression du bord frontal pour ces hivers très doux est montrée à la Figure 7.30, pour les bords frontaux complet et partiel. L'ensemble de ces figures montre la progression de la glace entre les chainages 10 et 67, soit entre la centrale SM-2 et la limite supérieure du réservoir de SM-2.

Le bord frontal partiel se forme généralement entre les PK 22 et 47 à la fin novembre ou au début décembre et progresse en moyenne vers le PK 59 (peut se trouver entre les PK 43 et 67 selon

l'année) entre les mois de décembre et mars (Figure 7.29). Le bord frontal complet se forme généralement entre les PK 17 et 35 durant le mois de décembre et progresse en moyenne vers le PK 55 (peut se trouver entre les PK 35 et 66 selon l'année) entre les mois de janvier et mars (Figure 7.28). Le bord frontal complet régresse vers le PK 15 entre la mi-mars et la fin avril tandis que le bord partiel régresse vers le PK 17 entre le début avril et la mi-mai.

Pour l'hiver le plus clément (Figure 7.30), soit 2009-2010, le bord frontal partiel débute au PK 59 à la mi-janvier et régresse graduellement jusqu'au PK 25 à la mi-avril. Le bord frontal complet est observé durant 17 jours seulement, et ce, entre la fin janvier et la mi-février au PK 35 uniquement.

Pour le second hiver le plus clément (Figure 7.30), soit 2020-2021, le bord frontal partiel se forme au PK 42 au début décembre et régresse au PK 30 avant d'entamer sa progression vers le PK 52. Il oscille entre les PK 42 et 52 pour terminer l'hiver au PK 20 à la mi-avril. Le bord frontal complet se forme au PK 35 à la mi-janvier, puis oscille entre les PK 17 et 36 au même rythme que le bord frontal partiel avant d'aboutir au PK 25 en début avril.

Notons que le bord frontal se trouve occasionnellement dans la zone 3 qui comprend l'entrée du réservoir de SM-2 et le tronçon fluvial à l'aval de la centrale SM-3. Les événements où le bord frontal complet se trouve dans la zone 3 sont répertoriés au Tableau 7.1. Le bord frontal partiel n'est pas répertorié dans les événements de formation du couvert de la zone 3 car celui-ci est considéré comme étant trop intermittent.

L'étude d'impacts de 1991 commandée par Hydro-Québec prévoyait la localisation du bord frontal complet au PK 35,5 et du bord frontal partiel au PK 61,5 lors de l'exploitation normale de SM-3 (Hydro-Québec, 1991). Ainsi, la prévision pour le bord frontal complet était fidèle aux observations puisque celui-ci a progressé minimalement jusqu'au PK 35 pour toutes les années étudiées, même pour les deux hivers les plus cléments malgré une durée très courte durant ceux-ci. Pour ce qui est du bord frontal partiel, celui-ci n'a atteint le PK 61,5 que durant 5 des 23 années étudiées (2004-2005, 2014-2015, 2015-2016, 2016-2017 et 2019-2020).

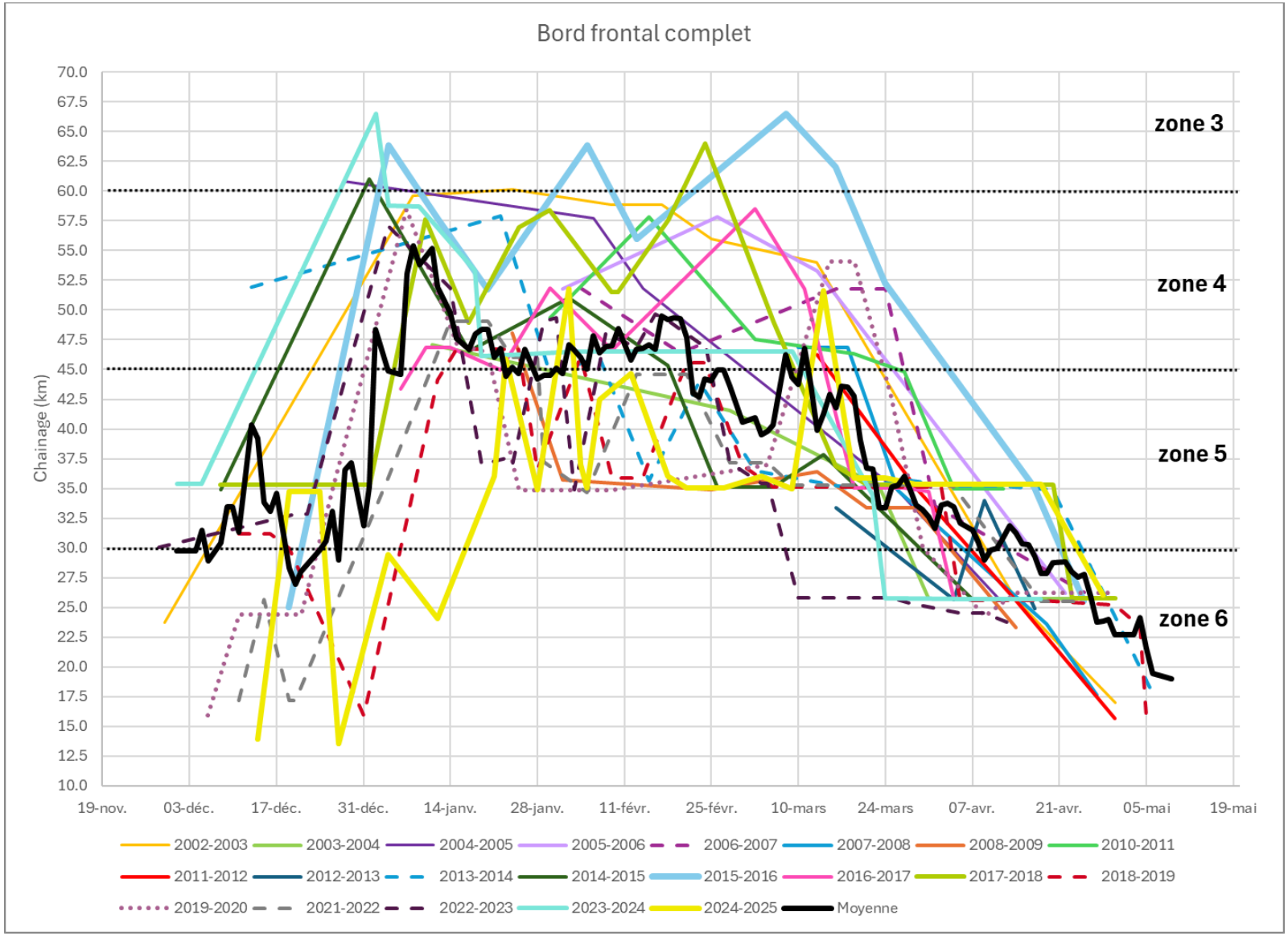


Figure 7.28 Progression typique du bord frontal couvert complet dans le réservoir de SM-2

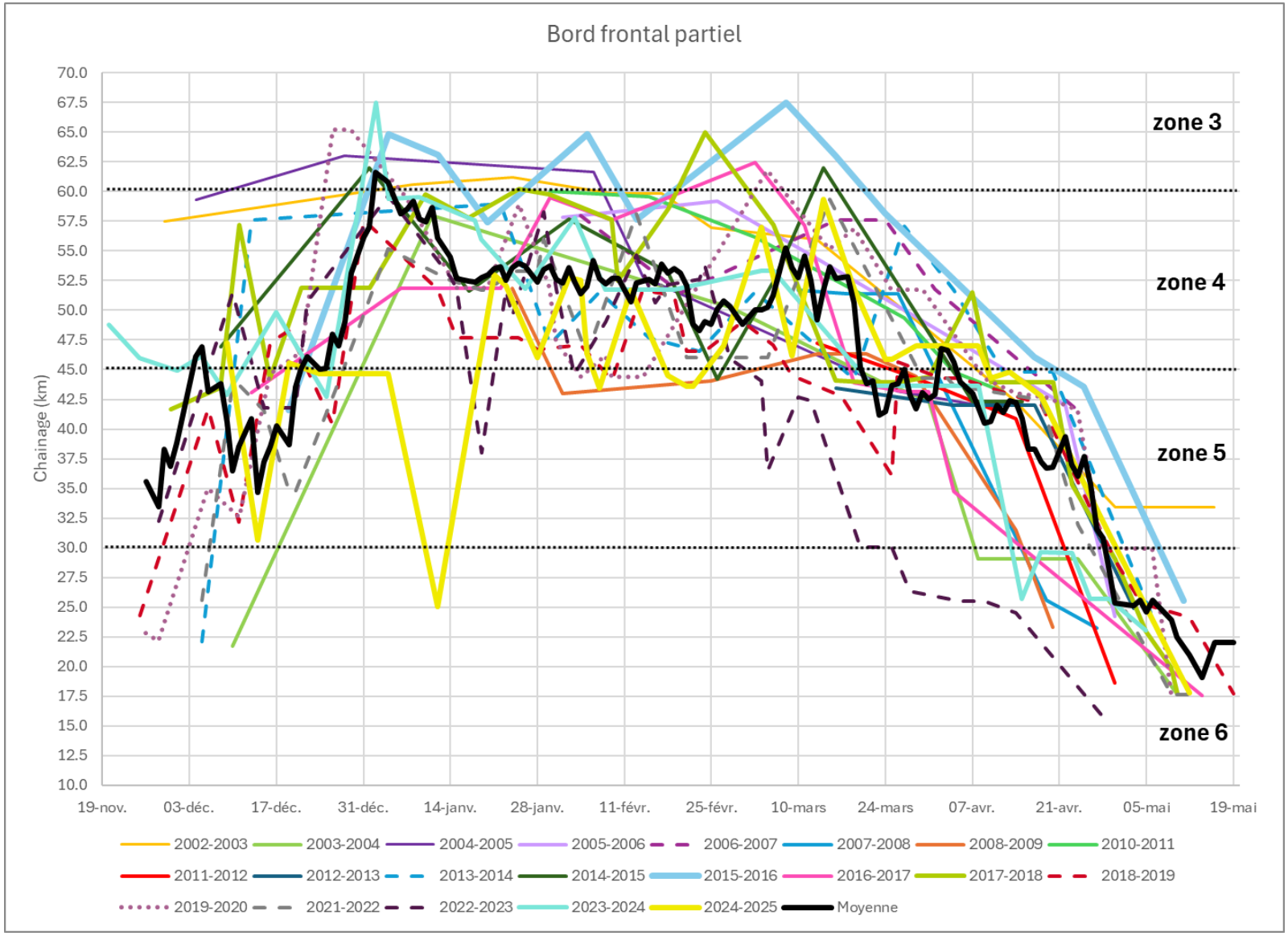


Figure 7.29 Progression typique du bord frontal couvert partiel dans le réservoir de SM-2

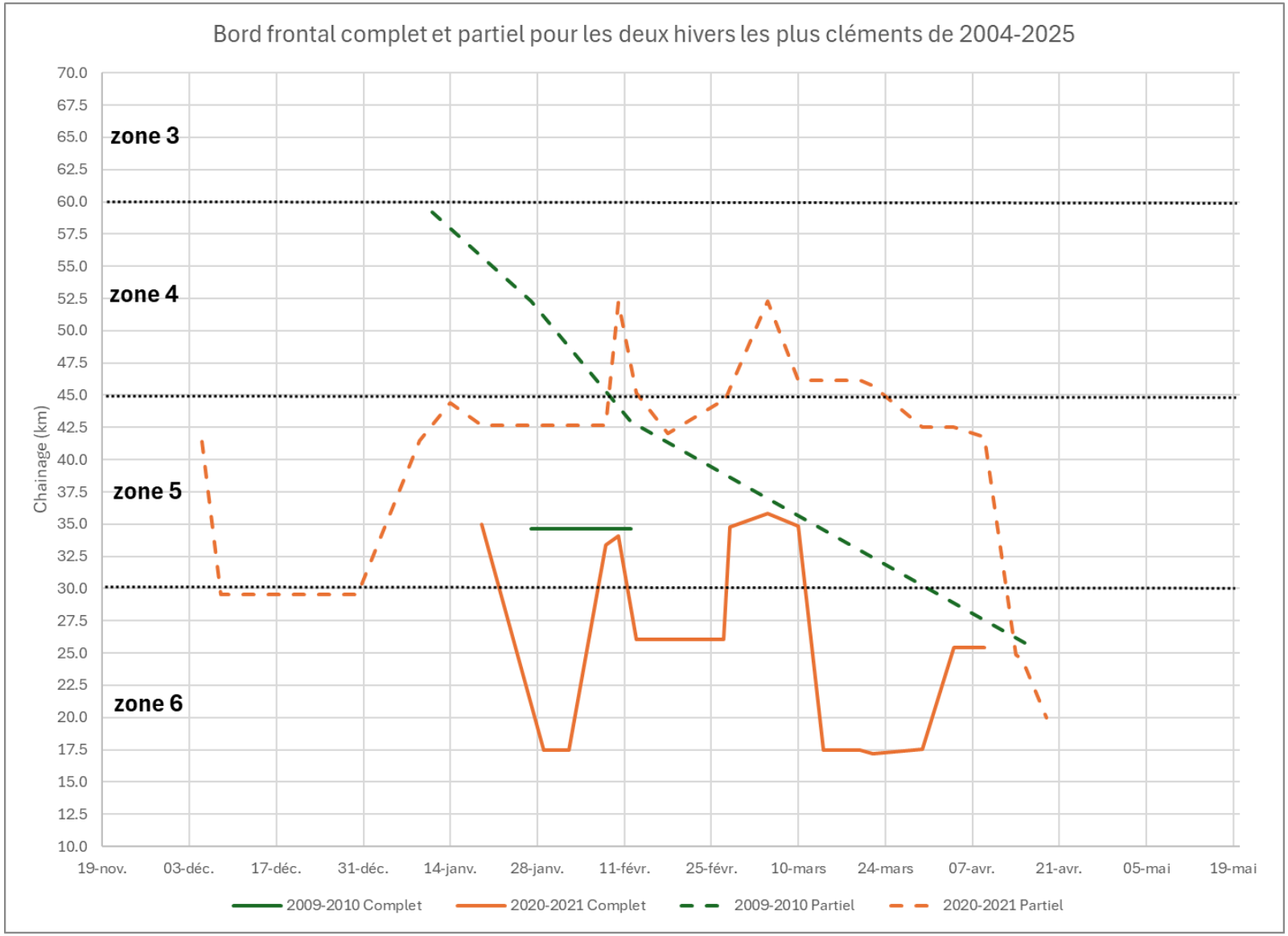


Figure 7.30 Progression du bord frontal (couverts complet et partiel) pour les deux hivers les plus cléments dans le réservoir de SM-2s

7.2.4 Conditions de glace le long des rives

Rappelons que la variation du niveau d'eau dans le réservoir de SM-2 à la hausse va de 0,110 m à 0,120 m avec une moyenne de 0,116 m et la variation à la baisse va de 0,039 m à 0,110 m avec une moyenne de 0,079 m, tel que décrit dans la section 5.2. Tel que précédemment expliqué dans la section 3.4.3, la fissuration le long des rives peut avoir lieu pour un couvert de glace avec une épaisseur de 0,2 à 0,8 m lorsque le rehaussement du niveau d'eau est entre 0,24 et 0,29 m ou lorsque l'abaissement du niveau d'eau est entre 0,05 et 0,10 m. Ainsi, le marnage à la baisse peut faire fissurer le couvert de glace le long des rives pour une bonne partie de l'hiver dans le réservoir de SM-2.

Finalement, la faible variation du niveau d'eau dans le réservoir de SM-2 ne risque pas de morceler le couvert et de créer des bandes riveraines de glace morcelée comme c'est le cas dans le réservoir de SM-3, mais il peut causer des fissures le long de la rive avec formation de « slush », tel que décrit par les utilisateurs dans la section 6.4. Certaines fissures pourraient également former les murs de glace décrits par les utilisateurs si le couvert se dépose sur un haut fond après le marnage, conduisant à des bandes d'eau libre au pied des murs de glace.

7.2.5 Accès au couvert de glace

Les périodes durant lesquelles l'épaisseur minimum requise pour l'accès sécuritaire au couvert de glace a été atteinte pour les zones 4 à 6 sont présentées de la Figure 7.31 à la Figure 7.33.

Pour la zone 4, la période ayant l'épaisseur minimum requise pour l'accès au couvert de glace est de 67-68 jours pour les deux hivers précédant la mise en marche du second groupe à SM-3. Depuis l'hiver 2006-2007, le couvert se formant dans la zone 4 n'atteint jamais l'épaisseur minimale requise de 27 cm pour y permettre un accès sécuritaire.

Pour la zone 5, la période ayant l'épaisseur minimum requise pour l'accès au couvert de glace varie de 0 à 75 jours avec une moyenne de 37 jours par an (ET = 27). Quatre des 19 dernières années n'ont pas atteint l'épaisseur minimale pour permettre un accès sécuritaire au couvert.

Pour la zone 6, la période ayant l'épaisseur minimum requise pour l'accès au couvert de glace varie de 42 à 112 jours avec une moyenne de 81 jours (ET = 17) par année.

En plus des périodes d'épaisseurs minimums sur l'ensemble du couvert de glace présentées ci-dessous pour les zones 5 et 6, il faut également examiner l'accès au couvert à partir de la rive et la présence potentielle de faiblesses locales pour statuer sur l'accessibilité générale du couvert de glace. L'analyse a montré que des faiblesses locales dans le couvert de glace se retrouvent à plusieurs endroits dans le réservoir de SM-2 dans les zones 5 et 6 à cause de chenaux préférentiels causant davantage d'érosion thermique. De plus, la fissuration en rive générant des bandes de « slush » et parfois des murs de glace avec de l'eau libre au pied des murs rend incertain l'accès au couvert de glace à partir de la rive, conformément à ce qui a été communiqué par les utilisateurs (section 6.4). En conditions de référence, l'utilisation du couvert de glace est donc

considérée possible dans certaines conditions et à certains endroits dans les zones 5 et 6, mais plutôt difficile.

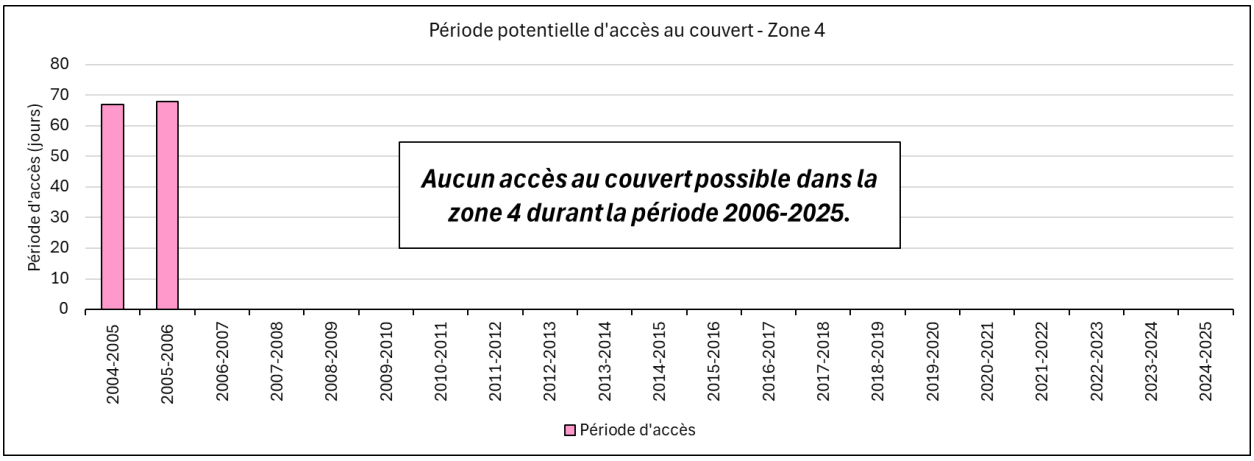


Figure 7.31 Période potentielle d'accès au couvert de glace – Zone 4

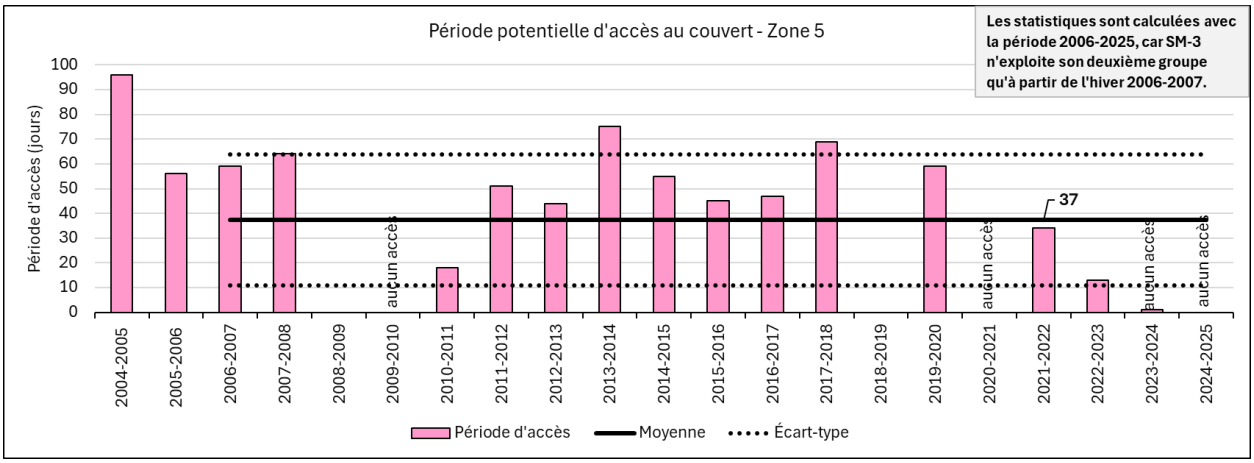


Figure 7.32 Période potentielle d'accès au couvert de glace – Zone 5

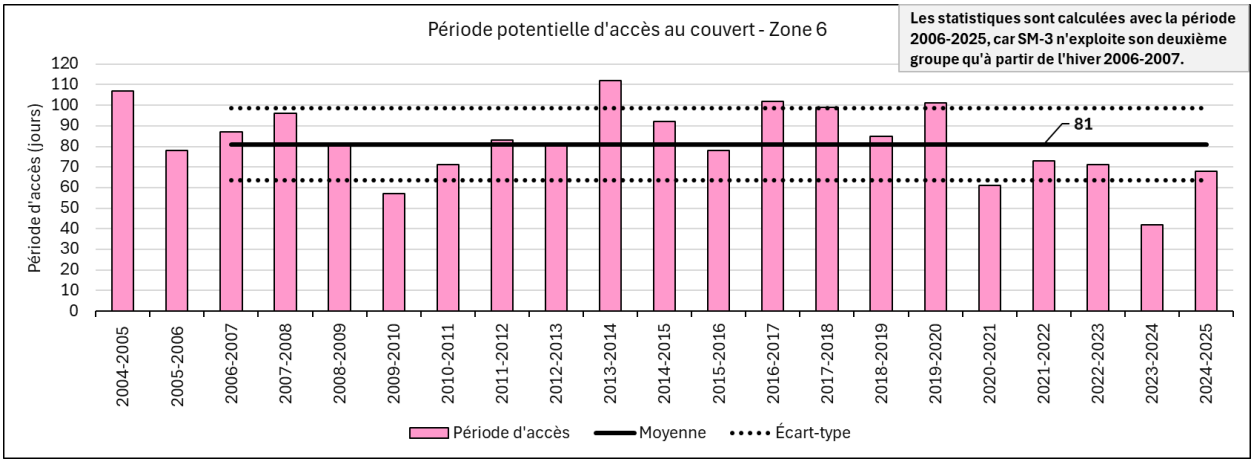


Figure 7.33 Période potentielle d'accès au couvert de glace – Zone 6

7.3 Retenue de SM-1

7.3.1 Dynamique glaciologique et hiver moyen

Pour la zone 7.1, la Figure 7.34 montre les dates de prise et de départ des glaces et la Figure 7.36 présente la durée globale annuelle des événements de formation de glace. La Figure 7.35 montre quant à elle les degrés-jours de gel à la prise et les degrés-jours de gel séparant le départ des glaces de la fin de l'hiver glaciologique.

La prise des glaces d'un premier événement de formation de glace a lieu en moyenne le 18 janvier dans la zone 7.1, à 587 degrés-jours de gel (ET = 137). Entre zéro et deux événements de formation de glace surviennent annuellement et, des 19 dernières années, 63 % connaissent un court événement unique. Les deux années sans couvert de glace dans la zone 7.1 (2009-2010 et 2020-2021) s'expliquent par la rigueur de ces hivers qui sont les deux plus cléments des 21 dernières années. La zone 7.1 totalise en moyenne 40 jours avec couvert de glace annuellement (ET = 22). Le départ du dernier événement a lieu avant la fin de l'hiver glaciologique, en moyenne 33 jours plus tôt (ET = 11), soit le 9 mars, 169 degrés-jours de gel avant que n'ait lieu la fin de l'hiver glaciologique (ET = 132).

Entre les centrales SM-2 et SM-1, seul un départ hâtif sur sept peut être expliqué par un redoux hivernal (2005-2006). De plus, un couvert sans neige est visible pour un seul de ces événements et un débit élevé a également été enregistré cette journée (2023-2024). Ainsi, les forts débits en provenance de SM-2 semblent être la cause principale des départs hâtifs de la zone 7.1 avec 5 des 7 événements ayant connu un débit maximal horaire de 1,3 et 2,6 fois la valeur du débit hivernal moyen durant le départ. Ces pointes de débit causent des débâcles mécaniques qui décrochent et morcèlent le couvert de glace dans cette zone, à l'aval de laquelle se trouvent trois estacades conçues spécifiquement pour retenir les glaces morcelées en amont de la prise d'eau de SM-1.

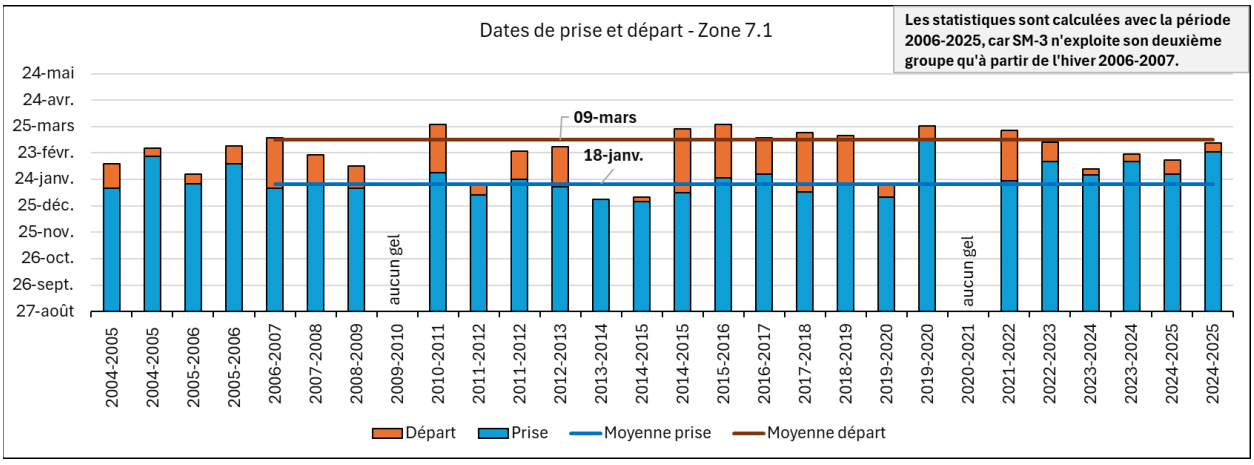


Figure 7.34 Dates de prise et de départ – Zone 7.1

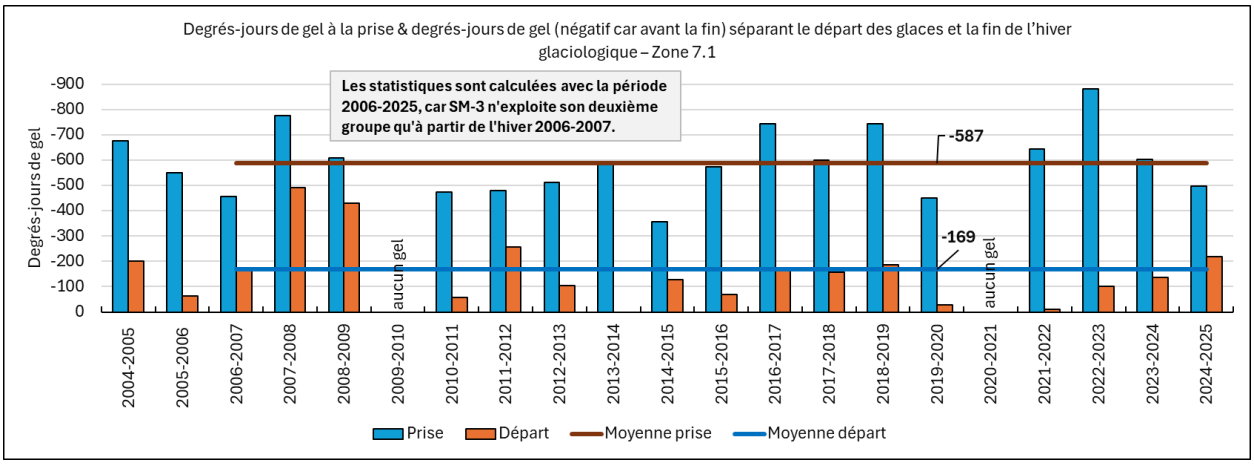


Figure 7.35 Degrés-jours de gel à la prise & degrés-jours de gel séparant le départ des glaces et la fin de l'hiver glaciologique – Zone 7.1

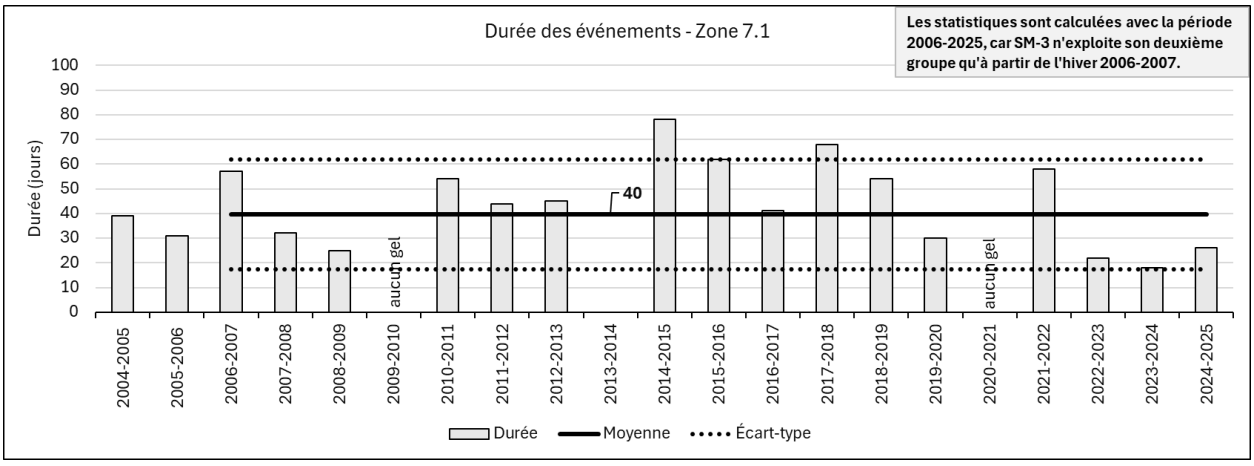


Figure 7.36 Durée de l'ensemble des événements de glace – Zone 7.1

7.3.2 Épaisseur du couvert de glace

Pour la zone 7.1, la Figure 7.37 montre les degrés-jours de gel effectifs de chaque événement de glace et la Figure 7.38 montre les épaisseurs de glace associées.

La zone 7.1 cumule en moyenne à 489 degrés-jours de gel effectifs (ET = 308) pour la génération de glace, ce qui engendre un couvert de glace d'épaisseur moyenne de 18 cm (ET = 8). Les épaisseurs de glace maximales annuelles estimées pour la zone 7.1 varient de 0 à 29 cm.

Aucune épaisseur de glace n'a été mesurée dans la zone 7.1 durant les campagnes terrain de 2002 à 2005 et de 2025, parce que le couvert de glace y est trop instable et donc inaccessible.

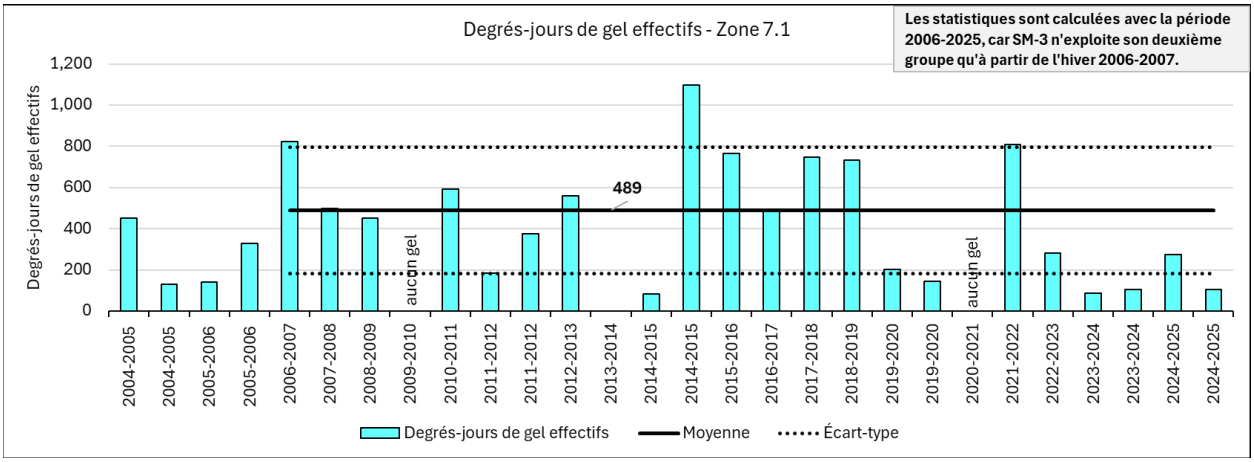


Figure 7.37 Degrés-jours de gel effectifs – Zone 7.1

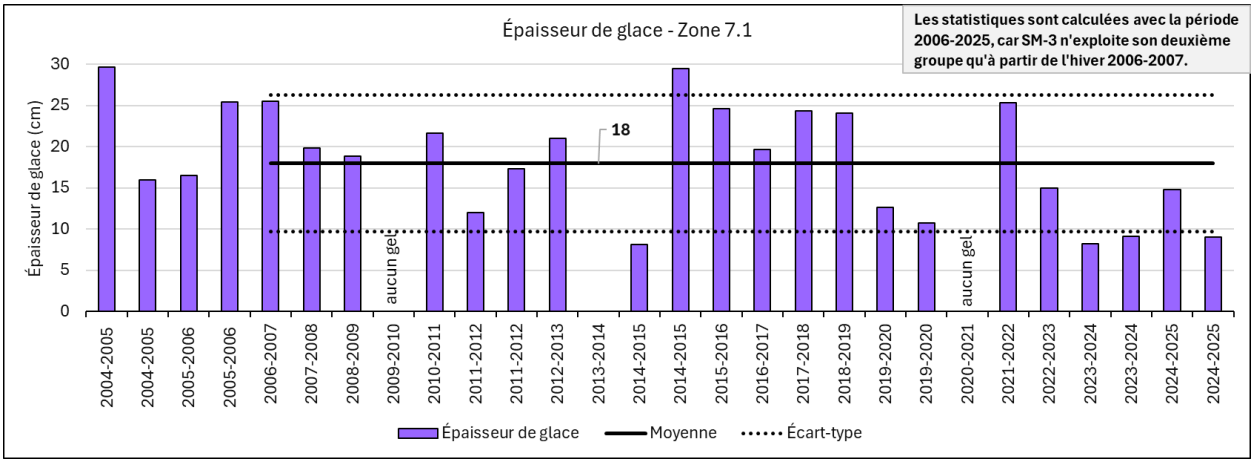


Figure 7.38 Épaisseurs de glace – Zone 7.1

7.4 Estuaire de la rivière Sainte-Marguerite

7.4.1 Dynamique glaciologique et hiver moyen

Pour la zone 7.2, la Figure 7.39 montre les dates de prise et de départ des glaces et la Figure 7.41 présente la durée globale annuelle des événements de glace. La Figure 7.40 montre quant à elle les degrés-jours de gel à la prise et les degrés-jours de gel séparant le départ des glaces de la fin de l'hiver glaciologique.

La prise des glaces d'un premier événement de formation de glace a lieu en moyenne le 12 janvier dans la zone 7.2, à 478 degrés-jours de gel (ET = 184). Entre zéro et trois événements de formation de glace surviennent annuellement et, des 19 dernières années, 47 % connaissent un événement unique. Pour ce qui est de l'année sans couvert de glace, elle s'explique par la rigueur de l'hiver qui est le deuxième plus clément de la série étudiée (2020-2021). La zone 7.2 totalise en moyenne 50 jours avec couvert de glace annuellement (ET = 23). Le départ a lieu avant la fin de l'hiver

glaciologique, en moyenne 30 jours plus tôt (ET = 13), soit le 13 mars, 116 degrés-jours de gel avant que n'ait lieu la fin de l'hiver glaciologique (ET = 86).

Entre la centrale SM-1 et l'estuaire, plusieurs éléments semblent en cause pour les départs hâtifs. Parmi les 13 événements recensés, cinq ont eu lieu durant un redoux hivernal. Ces redoux semblent être la cause unique de seulement trois de ces départs hâtifs (2005-2006, 2011-2012 et 2012-2013) et ils contribuent aux départs hâtifs de 2009-2010 et de 2023-2024 (le second de cette année) aidés d'une pointe de débit de 1,8 fois le débit moyen hivernal pour le premier et du rayonnement solaire pour le second. Les pointes de débit semblent causer 6 des 13 événements avec des pointes de débit horaire allant de 1,8 à 2,4 fois le débit hivernal moyen. Ces pointes de débit causent des débâcles mécaniques qui décrochent et morcèlent le couvert de glace avant son évacuation dans le fleuve Saint-Laurent. Les courants de marée descendante pourraient également être un facteur aggravant pour certains épisodes de départ hâtif.

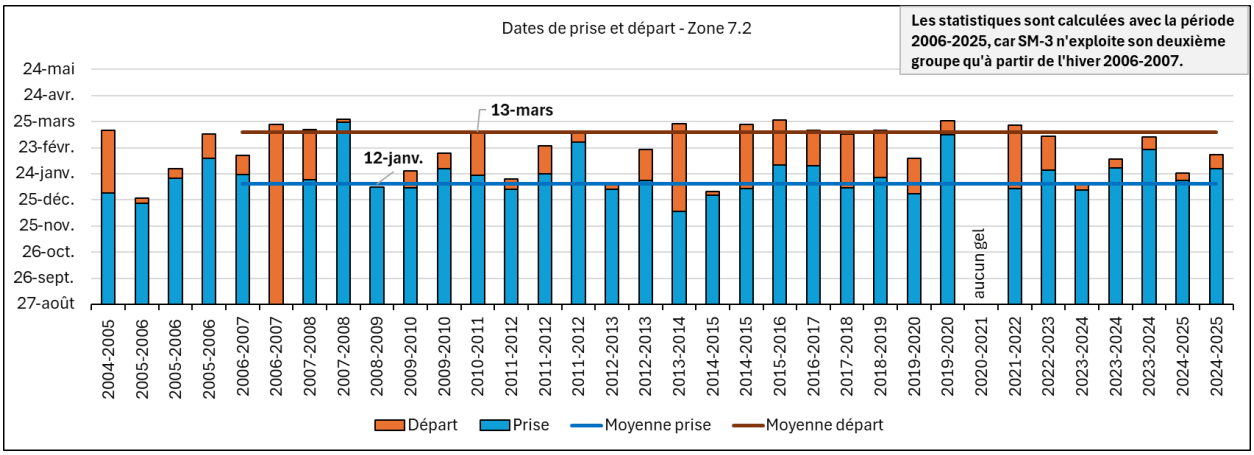


Figure 7.39 Dates de prise et de départ – Zone 7.2

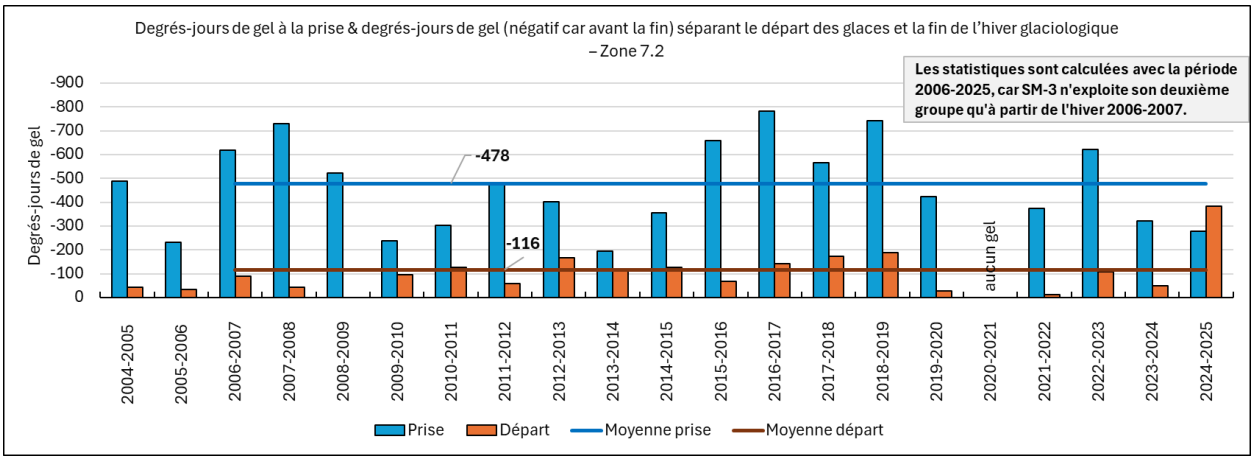


Figure 7.40 Degrés-jours de gel à la prise & degrés-jours de gel séparant le départ des glaces et la fin de l'hiver glaciologique – Zone 7.2

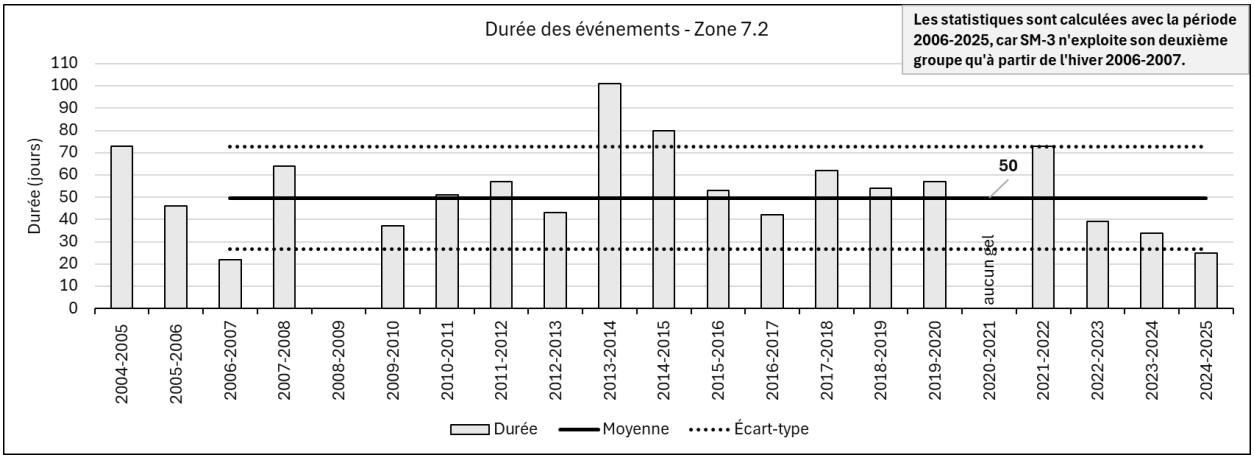


Figure 7.41 Durée de l'ensemble des événements de glace – Zone 7.2

7.4.2 Épaisseur du couvert de glace

Pour la zone 7.2, la Figure 7.42 montre les degrés-jours de gel effectifs de chaque événement de glace et la Figure 7.43 montre les épaisseurs de glace associées.

La zone 7.2 cumule en moyenne à 605 degrés-jours de gel effectifs (ET = 386) pour la génération de glace, ce qui engendre un couvert de glace d'épaisseur moyenne de 20 cm (ET = 8). Les épaisseurs de glace maximales annuelles estimées pour la zone 7.2 varient de 0 à 35 cm.

Aucune épaisseur de glace n'a été mesurée dans la zone 7.2 durant les campagnes terrain de 2002 à 2005 et de 2025 parce que le couvert de glace y est trop instable et donc inaccessible.

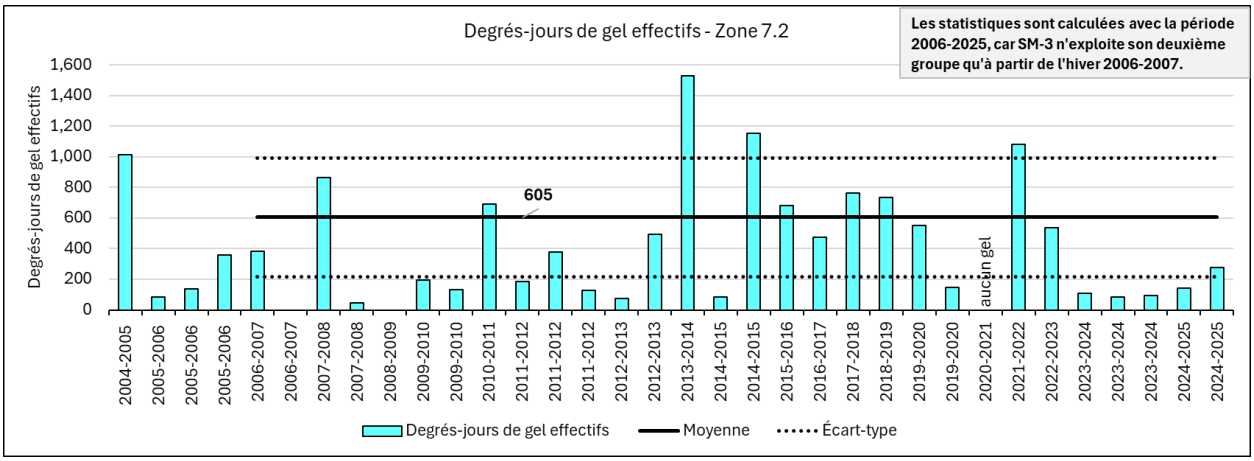


Figure 7.42 Degrés-jours de gel effectifs – Zone 7.2

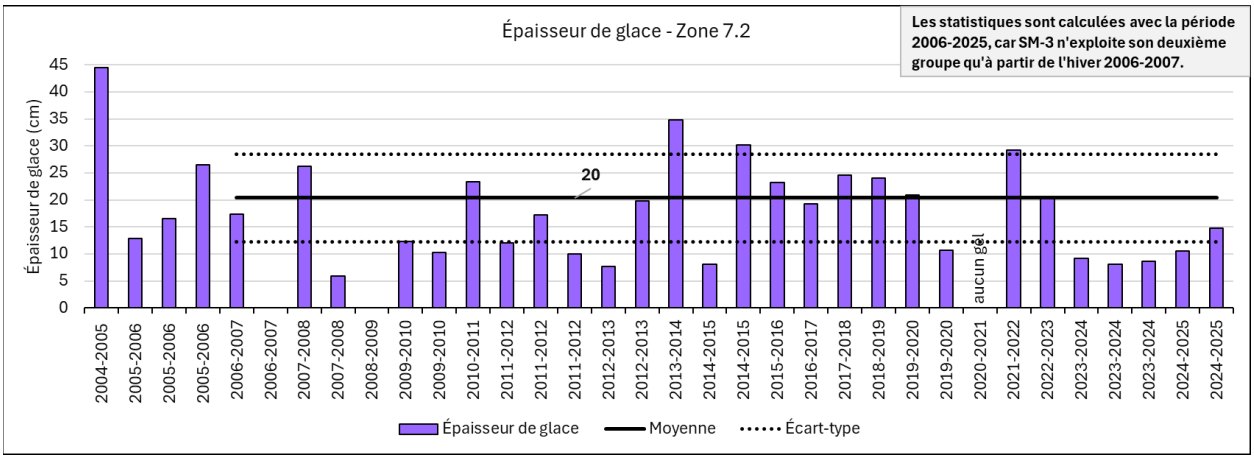


Figure 7.43 Épaisseurs de glace – Zone 7.2

7.5 Synthèse du régime des glaces

Le Tableau 7.2 présente la synthèse des données du régime des glaces pour l'ensemble des secteurs étudiés, mis à part la zone 3 qui connait très peu de formation de glace.

La Figure 7.44 montre les sites où de très faibles épaisseurs de glace (<10 cm) ont été mesurées durant le suivi des glaces d'Hydro-Québec. Ces épaisseurs ont toutes été relevées en 2002-2005 puisque les zones avec un couvert de glace très mince ont été évitées lors de la campagne de 2025 par souci de sécurité. Notons que les points montrés sur cette carte ne représentent pas les seules zones à risque de former une glace mince, mais bien les endroits où de telles mesures ont été effectivement relevées. Ainsi, d'autres sites de glace minces existent dans la zone d'étude mais ne sont pas identifiés sur cette carte.

Le réservoir de SM-3 (zones 1 et 2) gèle relativement tard en début d'hiver, soit vers la fin décembre, à cause de la température de cette grande masse d'eau qui refroidit lentement. À partir du moment où la colonne d'eau atteint l'isothermie automnale (4 °C), la couche de surface se refroidit jusqu'au point de congélation pour former une couverture de glace fixe. L'eau à l'exutoire de SM-3 atteint alors une température avoisinant les 2 °C. Une fois en place, la couverture de glace est une glace thermique très stable, similaire à celle d'un lac. Elle épaissit tout au long de l'hiver pour atteindre 63 cm en moyenne au début avril. La baisse du niveau d'eau en cours d'hiver génère des fissures ou charnières le long des berges pour que le couvert de glace continue à flotter à la surface de l'eau. L'eau remonte par les fissures et se mélange à la neige pour former des bandes de « slush ».

En conditions actuelles, le marnage dans le réservoir de SM-3 génère un champ de glace morcelé le long des rives qui atteint une largeur de l'ordre d'une trentaine de mètres à cause de la fissuration successive du couvert de glace. Les variations de débit n'ont probablement pas ou peu d'impact sur la dynamique des glaces du réservoir de SM-3. En effet, ce réservoir est très profond et les vitesses en surface demeurent inchangées par les variations de débit, à l'exception des

canaux d'amenée des ouvrages (prise d'eau et évacuateur où la vitesse de l'écoulement maintient une éclaircie tout au long de l'hiver).

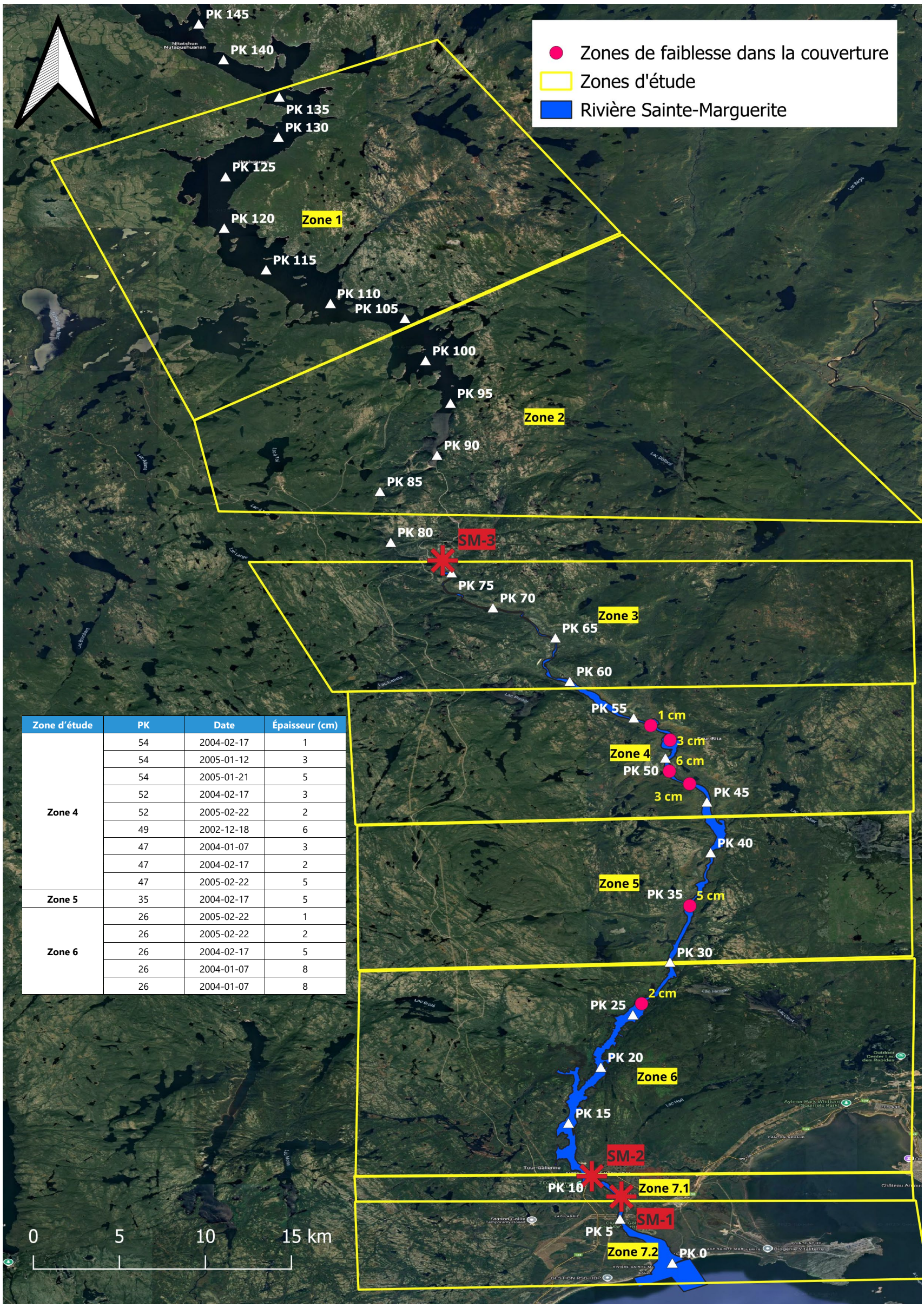
La période ayant l'épaisseur minimum requise pour l'accès sécuritaire au couvert de glace est d'une durée moyenne de trois mois annuellement dans le réservoir de SM-3. Le champ de glace morcelé en rives avec des surfaces de « slush » peut incommoder l'accès au couvert de glace qui demeure possible, mais avec certaines difficultés d'accès en rives.

La couverture de glace du réservoir de SM-3 demeure en place jusqu'à la mi-mai avec peu de variabilité d'une année à l'autre, soit bien longtemps après la fin de l'hiver glaciologique. Elle fond essentiellement sur place en se dégradant thermiquement par le rayonnement solaire après la fonte du couvert de neige et par le réchauffement progressif de la couche superficielle de l'eau. Les premières ouvertures en eau libre apparaissent au droit des fissures le long des rives et à l'exutoire des tributaires à cause de l'apport d'eau réchauffée (ruissèlement de la fonte des neiges et dégel hâtif des tributaires) qui fait fondre la glace de part et d'autre des fissures.

Le tronçon fluvial en aval de la centrale SM-3 et l'entrée du réservoir de SM-2 (zone 3) sont rarement couverts de glace et pendant peu de temps en raison de la température élevée de l'eau soutirée du réservoir de SM-3, mais aussi à cause des vitesses d'écoulement élevées (>1 m/s) et des variations de débit. L'eau reste au-dessus du point de congélation, mais les faibles débits conduisant à de faibles vitesses de l'écoulement combinées à des températures de l'air très froides permettent à la glace de s'y former occasionnellement. De plus, les apports hydrologiques intermédiaires avec une température de l'eau à 0 °C tout l'hiver deviennent plus significatifs en proportion à faible débit, ce qui refroidit l'eau issue de SM-3 et facilite ainsi la formation de la glace dans ce tronçon fluvial.

L'amont du réservoir de SM-2 (zone 4) est très sensible aux variations de débits, de températures de l'air et de températures de l'eau. La couverture de glace fixe sur la largeur du chenal s'y forme vers la mi-décembre, aidée par les faibles vitesses d'écoulement dans cette zone (<0,6 m/s). Le départ des glaces a lieu avant la fin de l'hiver glaciologique, soit vers la mi-mars. L'épaisseur de glace n'atteint qu'un maximum de 13 cm en moyenne dans les secteurs plus stables de la zone 4.

Depuis l'hiver 2006-2007, le couvert se formant dans la zone 4 n'atteint jamais l'épaisseur requise pour garantir un accès sécuritaire au couvert de glace. La couverture de glace fixe est très sensible aux pointes de débit en provenance de SM-3 pouvant facilement réinitialiser la formation de la couverture de glace sur l'ensemble du tronçon, et plus significativement entre l'entrée du réservoir au PK 66 et le PK 60.



Zone d'étude	PK	Date	Épaisseur (cm)
Zone 4	54	2004-02-17	1
	54	2005-01-12	3
	54	2005-01-21	5
	52	2004-02-17	3
	52	2005-02-22	2
	49	2002-12-18	6
	47	2004-01-07	3
	47	2004-02-17	2
	47	2005-02-22	5
Zone 5	35	2004-02-17	5
Zone 6	26	2005-02-22	1
	26	2005-02-22	2
	26	2004-02-17	5
	26	2004-01-07	8
	26	2004-01-07	8

Figure 7.44 Zones de faiblesse dans le couvert selon le suivi des glaces Hydro-Québec de 2002 à 2005

Tableau 7.2 Résumé du régime des glaces pour l'ensemble des zones étudiées durant la période 2006-2025 (excepté zone 3)

Secteur		Zone 1	Zone 2	Zone 4	Zone 5	Zone 6	Zone 7.1	Zone 7.2
Date de prise des glaces	Minimum	07-déc.	07-déc.	27-nov.	20-nov.	22-nov.	30-déc.	12-déc.
	Maximum	17-janv.	17-janv.	31-déc.	06-janv.	01-janv.	13-févr.	03-févr.
	Moyenne	**22-déc.**	**22-déc.**	**18-déc.**	**07-déc.**	**04-déc.**	**18-janv.**	**12-janv.**
	Écart-type	10.7	9.8	13	12	9	12	13
Date de départ des glaces	Minimum	04-mai	01-mai	29-janv.	16-mars	19-avr.	08-févr.	15-févr.
	Maximum	25-mai	24-mai	16-avr.	04-mai	14-mai	27-mars	28-mars
	Moyenne	**15-mai**	**14-mai**	**12-mars**	**16-avr.**	**05-mai**	**09-mars**	**13-mars**
	Écart-type	6	7	21	12	7	14	13
Degrés-jours de gel à la prise	Minimum	-198	-166	-70	-30	-37	-356	-194
	Maximum	-384	-384	-448	-280	-157	-881	-784
	Moyenne	**-290**	**-289**	**-220**	**-118**	**-100**	**-587**	**-478**
	Écart-type	53	56	123	66	33	137	184
Degrés-jours de gel ou de dégel séparant le départ des glaces et la fin de l'hiver glaciologique*	Minimum	88	88	-552	-92	36	-491	-383
	Maximum	199	192	0	29	88	-12	-12
	Moyenne	**141**	**133**	**-142**	**3**	**59**	**-169**	**-116**
	Écart-type	30	31	152	27	14	132	86
Degrés-jours de gel effectifs**	Minimum	613	654	0	70	657	0	0
	Maximum	1 747	1 722	1 629	1 695	1 758	1 099	1 527
	Moyenne	**1 233**	**1 235**	**742**	**1 126**	**1 264**	**489**	**605**
	Écart-type	309	292	453	414	311	308	386
Durée de l'ensemble des événements de formation de glace (jours)	Minimum	124	123	0	8	133	0	0
	Maximum	169	168	124	147	161	78	101
	Moyenne	**144**	**143**	**65**	**122**	**152**	**40**	**50**
	Écart-type	14	13	35	31	8	22	23
Épaisseur de glace (cm)	Minimum	45	46	0	7	32	0	0
	Maximum	76	75	21	37	52	29	35
	Moyenne	**63**	**63**	**13**	**29**	**44**	**18**	**20**
	Écart-type	8	8	6	7	6	8	8
Nombre d'événements de glace par année	Minimum	1	1	0	1	1	0	0
	Maximum	1	1	3	2	2	2	3
	Moyenne	**1**	**1**	**2**	**1**	**1**	**1**	**2**
	Écart-type	0	0	1	0	0	1	1
Événements uniques (proportion des années)		100%	100%	42%	79%	95%	63%	47%
Coefficient B	**2004-2006**	1,81	1,81	1,40	1,28	1,71	1,40	1,40
	2006-2025	1,81	1,81	0,53	0,89	1,25	0,89	0,89
Période potentielle d'accès au couvert (jours)	Minimum	67	69	0	0	42	Couvert trop instable pour être utilisé	Couvert trop instable pour être utilisé
	Maximum	118	117	0	75	112		
	Moyenne	**93**	**94**	**0**	**37**	**81**		
	Écart-type	16	16	0	27	17		
Nombre d'années sans période d'accès au couvert		0	0	19	4	0	-	-

*Pour un départ avant la fin de l'hiver glaciologique, nombre de degrés-jours de gel restant entre le départ et la fin de l'hiver glaciologique. Pour un départ après la fin de l'hiver glaciologique, nombre de degrés-jours de dégel avant le départ.

**Pour un départ avant la fin de l'hiver glaciologique, nombre de degrés-jours de gel au départ moins le nombre de degrés-jours de gel à la prise. Pour un départ après la fin de l'hiver glaciologique, la rigueur de l'hiver moins le nombre de degrés-jours de gel à la prise.

La partie intermédiaire du réservoir de SM-2 (zone 5) se comporte comme la partie aval du réservoir, mais celle-ci est beaucoup plus impactée par les vitesses de l'écoulement combinées à des températures de l'eau qui demeurent bien au-dessus du point de congélation. La prise des glaces a lieu un peu plus tard que celle de la partie aval, mais le départ des glaces a surtout lieu peu de temps après la fin de l'hiver glaciologique. De plus, des éclaircies ont été observées entre les PK 35 et 40 dans une section étroite où les vitesses de l'écoulement augmentent.

La période durant laquelle la couverture de glace est présente sur ce tronçon intermédiaire du réservoir est donc plus courte que le tronçon aval du réservoir et la glace n'atteint que 29 cm en moyenne dans les zones plus stables. Enfin, mentionnons que ce tronçon est moyennement sensible aux redoux hivernaux pouvant faire fondre la couverture de glace centrale (en laissant de la glace sur les rives) qui a tendance à se reformer facilement après le retour des températures froides.

La section aval du réservoir de SM-2 (zone 6) a une dynamique des glaces similaire à celle du réservoir de SM-3. Toutefois, le couvert de glace s'y forme plus tôt, au début décembre, car la masse d'eau est plus petite qu'à SM-3, ce qui accélère l'atteinte de l'isothermie automnale suivie du refroidissement de la couche en surface. De plus, le départ des glaces a lieu plus tôt puisque l'hiver glaciologique s'y termine plus tôt. L'épaisseur de glace maximale est d'environ 44 cm et la dynamique des glaces est devancée de 10 à 15 jours par rapport à celle dans le réservoir de SM-3.

Dans le réservoir de SM-2, la faible variation du niveau d'eau ne risque pas de morceler le couvert et de créer des bandes riveraines de glace morcelée comme c'est le cas dans le réservoir de SM-3, mais il peut causer des fissures le long de la rive avec formation de « slush ».

Il est à souligner que la campagne de suivi des glaces de 2002 à 2005 a mis en évidence des faiblesses ponctuelles dans le couvert de glace au cœur de l'hiver dans les zones 4 (PK 54, 52, 49 et 47), 5 (PK 35-40) et 6 (PK 26) même si le couvert de glace formé y est stable dans son ensemble (voir sections 7.2.1 et 7.2.2, Figure 7.44 et Tableau 7.2). Ces faiblesses indiquent la possibilité de la présence de chenaux où les vitesses de l'écoulement se concentrent et augmentent ainsi localement l'érosion thermique. L'opération au débit de 300 m^3/s rend les zones suivantes à risque pour la glace mince : PK 15,7 à 16, PK 18 à 23 et l'ensemble du réservoir à l'amont du PK 26,25. De plus, une réduction notable de l'épaisseur moyenne a été observée entre la période 2002-2005 et l'hiver 2024-2025 en aval de la centrale SM-3.

Le bord frontal de glace entre SM-3 et SM-2 a une dynamique particulière, à l'exception des cas avec des hivers très cléments générant peu de glace. Le bord frontal partiel se forme généralement entre les PK 22 et 47 à la fin novembre ou au début décembre et progresse en moyenne vers le PK 59 entre les mois de décembre et mars. Le bord frontal complet se forme généralement entre les PK 17 et 35 durant le mois de décembre et progresse en moyenne vers le PK 55 entre les mois de janvier et mars. Le bord frontal complet régresse vers le PK 15 entre la mi-mars et la fin avril tandis que le bord partiel régresse vers le PK 17 entre le début avril et la mi-mai.

Dans la partie intermédiaire du réservoir de SM-2 (zone 5), la période ayant l'épaisseur minimum requise pour l'accès au couvert de glace est en moyenne de 37 jours annuellement et 4 des 19 dernières années n'ont pas atteint l'épaisseur minimale pour y permettre l'accès sécuritairement. Dans la partie aval du réservoir (zone 6), la période ayant l'épaisseur minimum requise pour l'accès au couvert de glace est en moyenne de 81 jours annuellement, soit très similaire à la période dans le réservoir de SM-3. Des faiblesses locales dans le couvert de glace se retrouvent à plusieurs endroits dans le réservoir de SM-2 dans les zones 5 et 6 à cause de chenaux préférentiels causant de l'érosion thermique. De plus, la fissuration en rive générant des bandes de « slush » et parfois des murs de glace avec de l'eau libre au pied des murs rend incertain l'accès au couvert de glace à partir de la rive, ce qui a été communiqué par les utilisateurs du couvert de glace. En conditions de référence, l'utilisation du couvert de glace est donc considérée possible dans certaines conditions et à certains endroits dans les zones 5 et 6, mais plutôt difficile.

La retenue de SM-1 (zone 7.1) et l'estuaire de la rivière (zone 7.2) ont des couvertures de glace très instables à cause des vitesses de l'écoulement relativement élevées (>0,6 m/s) combinées à des températures de l'eau hivernales qui demeurent au-dessus du point de congélation (0,8 °C ±0,5 °C). La prise des glaces y a lieu vers la mi-janvier et le départ des glaces vers la mi-mars. L'épaisseur de glace n'atteint que 19 cm en moyenne en fin d'hiver dans les secteurs plus stables.

La couverture de glace fixe de ces zones est très sensible aux pointes de débits en provenance de SM-2 et la zone 7.2 est également sensible aux mouvements de marée et aux redoux hivernaux et printaniers. Ces phénomènes peuvent facilement réinitialiser la formation de la couverture de glace sur l'ensemble des tronçons et le couvert peut difficilement se reformer si le départ hâtif a lieu après la mi-février. La présence d'un couvert de glace peu épais le rend vulnérable à la débâcle mécanique causée par les pointes de débit. C'est la raison pour laquelle la centrale SM-1 dispose de trois estacades à glace en amont de sa prise d'eau, pour retenir les plaques de glace morcelées générées par des épisodes de débâcle mécanique.

8 IMPACTS ANTICIPÉS

D'après les analyses effectuées dans ce rapport ainsi que notre expérience, on peut envisager les impacts potentiels sur le régime des glaces, tels que décrits dans les sections suivantes.

Rappelons que l'accès au couvert de glace dans la zone d'étude reste incertain d'une année à l'autre. Dans le réservoir de SM-3 (entre les PK 85 et 135), l'accès au couvert demeure possible, mais avec certaines difficultés d'accès en rives. Dans la partie amont du réservoir de SM-2 (PK 45 à 60), le couvert n'atteint jamais l'épaisseur requise pour garantir un accès sécuritaire depuis l'hiver 2006-2007. Dans le reste du réservoir de SM-2, l'utilisation du couvert de glace est considérée possible dans certaines conditions et à certains endroits, mais plutôt difficile.

Finalement, dans le cas où les modifications à l'exploitation de la centrale SM-3 n'auraient pas d'effets sur les conditions hydrauliques et thermiques de la zone étudiée, le régime des glaces pourrait tout de même être modifié par le réchauffement de la température de l'air lié aux changements climatiques.

8.1 Hydraulicité

En conditions futures avec un troisième groupe, il est raisonnable de supposer que les figures de débits à la centrale SM-3 (Figure 4.1 et Figure 5.2) incluront un palier supplémentaire au débit d'équipement retenu autour de 500 m^3/s, tout comme celles du PK 75 (Figure 5.3 et Figure 5.4). De plus, on s'attend à ce que la gamme de variation du débit hivernal à SM-2 (Figure 5.5 et Figure 5.6) soit entre 50 m^3/s et un débit proche du débit d'équipement choisi à SM-3 grâce à l'utilisation d'un deuxième pertuis à l'évacuateur de SM-2.

En conditions futures, les vitesses augmentent de 0,2 à 0,6 m/s pour le tronçon fluvial et l'entrée du réservoir de SM-2 (jusqu'au PK 60) et de 0,1 à 0,2 m/s dans le réservoir de SM-2 entre les PK 60 et 50. De plus, si le débit acheminé par le tronçon SM2-SM1 augmente, les bandes riveraines avec écoulement quasi stagnant pourraient être moins larges et le couvert de glace à cet endroit serait donc moins étendu entre les deux centrales.

En l'absence de données de marnage en conditions futures durant le démarrage des trois groupes à SM-3, il est possible d'extrapoler les valeurs des conditions actuelles pour obtenir une estimation du marnage en conditions futures. En projetant ces variations pour un régime à trois groupes à SM-3, soit proportionnellement à une augmentation de débit de 300 à 500 m^3/s, on obtient une variation moyenne du niveau d'eau dans le réservoir de SM-2 en conditions futures. Ces variations, présentées au Tableau 8.1, sont en moyenne de 0,194 m à la hausse et de 0,131 m à la baisse. Elles représentent une augmentation de 0,078 m à la hausse et de 0,052 m à la baisse par rapport à la période actuelle.

Tableau 8.1 Marnage moyen dans le réservoir de SM-2 à la suite du démarrage rapide de SM-3 en conditions futures (0-500 m^3/s)

Marnage à la hausse	Marnage à la baisse
0,194 m	0,131 m

Le secteur estuarien en aval de SM-1 subirait, quant à lui, l'augmentation des débits issus de SM-1, ce qui réduirait l'intrusion des courants de marée dans l'estuaire durant les périodes à forts débits.

8.2 Réservoir SM-3

Le réservoir de SM-3 (zones 1 et 2) ne connaitra presque pas d'impact, car ce secteur possède une dynamique des glaces plutôt résiliente aux variations de débit et de température de l'eau.

Une analyse de sensibilité de l'accès potentiel au couvert à une augmentation du marnage de 4 m a été réalisée, puis les résultats ont été comparés à ceux du marnage historique moyen. Pour le marnage de 9,6 m, la largeur du champ de glace morcelé varie de 24 à 60 m avec une moyenne de 35 m pour la rive droite et de 26 à 79 m avec une moyenne de 45 m pour la rive gauche.

Ainsi, l'augmentation de la largeur du champ de glace morcelé entre les marnages de 5,6 et 9,6 m varie de 4 à 19 m avec une moyenne de 9 m pour la rive droite et de 5 à 27 m avec une moyenne de 13 m pour la rive gauche, tel que présenté dans le Tableau 8.2. La bande de glace morcelée élargie le long des rives sera également accompagnée de « slush » comme en conditions actuelles. Ces variations moyennes de l'ordre d'une dizaine de mètres sur une largeur actuelle d'une trentaine de mètres ne risquent pas d'avoir un impact significatif sur l'accès au couvert de glace sur le réservoir de SM-3.

Tableau 8.2 Écart de la largeur de la bande de glace morcelée en rive entre les marnages historique et projeté

Statistique	Écart rive droite	Écart rive gauche
Pente minimale	19 m	27 m
Pente médiane	9 m	13 m
Pente maximale	4 m	5 m

8.3 Tronçon entre les centrales SM-3 et SM-2

Le tronçon fluvial à l'aval de la centrale SM-3 et l'entrée du réservoir de SM-2 (zone 3) connait déjà peu d'événements de formation de glace et pourrait en connaitre encore moins avec la hausse des débits sortants de la centrale de SM-3 en période hivernale.

L'amont du réservoir de SM-2 (zone 4) serait impacté par l'augmentation des débits de pointe pouvant aller jusqu'à 500 m^3/s, même si ces pointes auront lieu sur de courtes durées et même si les températures de l'eau demeureront, a priori, pratiquement inchangées. Les températures de l'eau déjà au-dessus du point de congélation à l'exutoire de SM-3, combinées à des pointes de débit pouvant aller jusqu'à 500 m^3/s, risquent d'augmenter significativement le flux thermique, soit la quantité d'échanges de chaleur pouvant faire fondre une glace qui est déjà très instable en conditions actuelles. Les épaisseurs de glace sur les courts tronçons qui demeureront couverts de glace pourraient demeurer faibles avec des éclaircies tout au long de l'hiver. Les pointes de débit en présence d'un couvert de glace mince pourraient également causer une débâcle mécanique de la couverture de glace tel qu'observé en aval de certaines centrales hydroélectriques. Depuis l'hiver 2006-2007, le couvert se formant dans la zone 4 n'atteint jamais l'épaisseur minimum requise pour l'accès au couvert de glace. Le couvert de glace demeurera donc inaccessible en conditions futures, comme c'est le cas en conditions actuelles.

Le tronçon intermédiaire du réservoir de SM-2 (zone 5) est probablement le tronçon qui sera exposé aux plus grands changements du régime des glaces. Ce tronçon est déjà touché par les conditions hydrauliques et thermiques actuelles qui ne favorisent pas l'épaississement du couvert de glace qui comporte plusieurs éclaircies. Les pointes de débit en conditions futures avec un troisième groupe risquent d'augmenter la superficie des éclaircies observées et d'en créer d'autres. Les épaisseurs de glace en amont et en aval des éclaircies pourraient demeurer faibles tout au long de l'hiver. Les pointes de débit en présence d'un couvert de glace mince pourraient également causer une débâcle mécanique de la couverture de glace sur certains tronçons. Ces impacts potentiels sur la glace pourraient réduire la durée de la période ayant l'épaisseur minimum requise pour l'accès au couvert de glace ainsi que les tronçons possiblement praticables en plus d'augmenter le nombre ainsi que l'étendue des zones fragilisées et non sécuritaires.

La partie aval du réservoir de SM-2 (zone 6) sera moins impactée que le reste du réservoir, car ce secteur a une dynamique des glaces plus résiliente aux variations de débit et de température de l'eau. Toutefois, de très faibles épaisseurs de glace ont été relevées durant l'ensemble des campagnes de mesures. De plus, l'épaisseur de glace moyenne en février a significativement diminué entre la période 2002-2005 et l'hiver 2024-2025, ce qui est en partie causé par l'ajout du deuxième groupe à la centrale SM-3. Ceci indique que cette zone pourrait se retrouver avec plus de petites éclaircies dans le futur et davantage de faiblesses dans la couverture de glace. L'accès au couvert de glace sera donc impacté par l'augmentation des faiblesses, mais il est difficile de quantifier précisément cet impact. De plus, l'apparition de nouvelles faiblesses est un enjeu plus sévère que les éclaircies pour la sécurité des utilisateurs du couvert car ces faiblesses ne sont pas apparentes, contrairement aux éclaircies.

Dans le réservoir de SM-2, les faibles variations du niveau d'eau de 0,194 m à la hausse et de 0,131 m à la baisse estimées pour le régime à trois groupes ne risquent pas de morceler le couvert et de créer des bandes riveraines de glace morcelées comme c'est le cas dans le réservoir de SM-3, mais seulement de causer une fissure le long de la rive. Toutefois, le marnage pourra probablement faire fissurer le couvert de glace le long des rives de manière systématique, soit pour des épaisseurs de glace inférieures à 0,8 m. Il y aura donc un impact de l'ajout d'un troisième groupe sur la fissuration de la glace en berge et les étendues des bandes de « slush » le long des rives. Il est ainsi possible d'affirmer que l'accès au couvert de glace en zones 5 et 6 sera plus difficile en conditions futures qu'en conditions actuelles.

8.4 Retenue de SM-1 et estuaire de la rivière Sainte-Marguerite

La retenue de SM-1 (zone 7.1) et l'estuaire de la rivière Sainte-Marguerite (zone 7.2) seraient impactés par l'augmentation des débits de pointe pouvant aller jusqu'à 500 m^3/s, même si ces pointes auront lieu sur de courtes durées et même si les températures de l'eau demeureront pratiquement inchangées. Les températures de l'eau déjà au-dessus du point de congélation à l'exutoire de SM-2, combinées à des pointes de débit pouvant aller jusqu'à 500 m^3/s, risquent d'augmenter significativement le flux thermique, soit la quantité d'échanges de chaleur pouvant faire fondre une glace qui est déjà très instable en conditions actuelles, surtout dans le chenal principal mais possiblement aussi pour le couvert près des rives. Les pointes de débit en présence d'un couvert de glace mince pourraient également causer une débâcle mécanique de la couverture de glace tel qu'observé en aval de certaines centrales hydroélectriques. En conditions actuelles, l'utilisation du couvert de glace entre la centrale SM-2 et l'estuaire n'est pas considérée comme sécuritaire en raison de l'instabilité du couvert dans cette zone. Cette situation persistera donc en conditions futures avec l'ajout d'un troisième groupe à SM-3.

9 CONCLUSION

Le présent mandat vise la participation à l'avant-projet de l'ajout d'un troisième groupe turbine-alternateur à la centrale SM-3, située sur la rivière Sainte-Marguerite à quelques 75 km en amont de son embouchure. Les effets environnementaux du projet sont à évaluer en phases de construction et d'exploitation, car le projet est assujetti au processus d'étude d'impact sur l'environnement. Ainsi, une étude sectorielle sur l'état de référence et les impacts du projet est requise dans le cadre d'une étude d'impact provinciale.

L'objectif de l'étude du régime des glaces est de définir le régime des glaces en conditions actuelles et de décrire les changements anticipés à la couverture de glace pour les tronçons touchés par l'ajout d'un troisième groupe à SM-3.

Une analyse des conditions météorologiques, thermiques et hydrologiques a d'abord permis de décrire les paramètres qui contrôlent la dynamique des glaces. Les survols héliportés effectués par Hydro-Québec pour les hivers 2002-2005 et 2023-2025 ont servi à décrire la dynamique générale du couvert de glace dans l'ensemble de la zone d'étude. Les mesures d'épaisseurs réalisées de 2002 à 2005 et en 2025 ont servi à estimer l'épaisseur de la couverture de glace pour la période récente. Les images satellitaires ont été utilisées afin d'établir l'historique de la dynamique des glaces en conditions actuelles pour chacun des tronçons à l'étude, conjointement avec les données de terrain disponibles. La dynamique des glaces a ensuite été mise en relation avec les paramètres environnementaux qui la contrôlent pour expliquer les particularités de chacun des tronçons étudié.

Le réservoir de SM-3 (zones 1 et 2) gèle relativement tard en début d'hiver, soit vers la fin décembre, à cause de la température de cette grande masse d'eau qui refroidit lentement. À partir du moment où la colonne d'eau atteint l'isothermie automnale (4 °C), la couche de surface se refroidit jusqu'au point de congélation pour former une couverture de glace fixe. L'eau à l'exutoire de SM-3 atteint alors une température avoisinant les 2 °C. Une fois en place, la couverture de glace est une glace thermique très stable, similaire à celle d'un lac. Elle épaissit tout au long de l'hiver pour atteindre 63 cm en moyenne au début avril. La baisse du niveau d'eau en cours d'hiver génère des fissures ou charnières le long des berges pour que le couvert de glace continue à flotter à la surface de l'eau. L'eau remonte par les fissures et se mélange à la neige pour former des bandes de « slush ».

En conditions actuelles, le marnage dans le réservoir de SM-3 génère un champ de glace morcelé le long des rives qui atteint une largeur de l'ordre d'une trentaine de mètres à cause de la fissuration successive du couvert de glace. Les variations de débit n'ont probablement peu ou pas d'impact sur la dynamique des glaces du réservoir de SM-3. En effet, ce réservoir est très profond et les vitesses en surface demeurent inchangées par les variations de débit, à l'exception des canaux d'amenée des ouvrages (prise d'eau et évacuateur où la vitesse de l'écoulement maintient une éclaircie tout au long de l'hiver).

La période ayant l'épaisseur minimum requise pour l'accès au couvert de glace est d'une durée moyenne de trois mois annuellement dans le réservoir de SM-3. Le champ de glace morcelé en rive avec des surfaces de « slush » peut incommoder l'accès au couvert de glace à partir de la rive. L'accès au couvert est donc possible, mais avec certaines difficultés d'accès en rives.

La couverture de glace demeure en place jusqu'à la mi-mai avec peu de variabilité d'une année à l'autre, soit bien longtemps après la fin de l'hiver glaciologique. Elle fond essentiellement sur place en se dégradant thermiquement par le rayonnement solaire après la fonte du couvert de neige et par le réchauffement progressif de la couche superficielle de l'eau. Les premières ouvertures en eau libre apparaissent au droit des fissures le long des rives et à l'exutoire des tributaires à cause de l'apport d'eau réchauffée (ruissèlement de la fonte des neiges et dégel hâtif des tributaires) qui fait fondre la glace de part et d'autre des fissures.

Le tronçon fluvial en aval de la centrale SM-3 et l'entrée du réservoir de SM-2 (zone 3) sont rarement couverts de glace et pendant peu de temps en raison de la température élevée de l'eau soutirée du réservoir de SM-3, mais aussi à cause des vitesses d'écoulement élevées (>1 m/s) et des variations de débit. L'eau reste au-dessus du point de congélation, mais les faibles débits conduisant à de faibles vitesses de l'écoulement combinées à des températures de l'air très froides permettent à la glace de s'y former occasionnellement. De plus, les apports hydrologiques intermédiaires avec une température de l'eau à 0 °C tout l'hiver deviennent plus significatifs en proportion à faible débit, ce qui refroidit l'eau issue de SM-3 et facilite ainsi la formation de la glace dans ce tronçon fluvial.

L'amont du réservoir de SM-2 (zone 4) est très sensible aux variations de débits, de températures de l'air et de températures de l'eau. La couverture de glace fixe sur la largeur du chenal s'y forme vers la mi-décembre, aidée par les faibles vitesses d'écoulement dans cette zone (<0,6 m/s). Le départ des glaces a lieu avant la fin de l'hiver glaciologique, soit vers la mi-mars. L'épaisseur de glace n'atteint qu'un maximum de 13 cm en moyenne dans les secteurs plus stables. Depuis l'hiver 2006-2007, le couvert se formant dans la zone 4 n'atteint jamais l'épaisseur requise pour l'accès au couvert de glace. La couverture de glace fixe est très sensible aux pointes de débit en provenance de SM-3 pouvant facilement réinitialiser la formation de la couverture de glace sur l'ensemble du tronçon, et plus significativement entre l'entrée du réservoir au PK 66 et le PK 60.

La partie intermédiaire du réservoir de SM-2 (zone 5) se comporte comme la partie aval du réservoir, mais celle-ci est beaucoup plus impactée par les vitesses de l'écoulement combinées à des températures de l'eau qui demeurent bien au-dessus du point de congélation. La prise des glaces a lieu un peu plus tard que celle de la partie aval, mais le départ des glaces a surtout lieu peu de temps après la fin de l'hiver glaciologique. De plus, des éclaircies ont été observées entre les PK 35 et 40 dans une section étroite où les vitesses de l'écoulement augmentent. La période durant laquelle la couverture de glace est présente sur ce tronçon intermédiaire du réservoir est donc plus courte que le tronçon aval du réservoir et la glace n'atteint que 29 cm en moyenne dans les zones plus stables. La période ayant l'épaisseur minimum requise pour l'accès au couvert de

glace est en moyenne de 37 jours annuellement et 4 des 19 dernières années n'ont pas atteint l'épaisseur minimale pour y permettre l'accès sécuritairement. Enfin, mentionnons que ce tronçon est moyennement sensible aux redoux hivernaux pouvant faire fondre la couverture de glace centrale (en laissant de la glace sur les rives) qui a tendance à se reformer facilement après le retour des températures froides.

La section aval du réservoir de SM-2 (zone 6) a une dynamique des glaces similaire à celle du réservoir de SM-3. Toutefois, le couvert de glace s'y forme plus tôt, au début décembre, car la masse d'eau est plus petite qu'à SM-3, ce qui accélère l'atteinte de l'isothermie automnale suivie du refroidissement de la couche en surface. De plus, le départ des glaces a lieu plus tôt puisque l'hiver glaciologique s'y termine plus tôt. L'épaisseur de glace maximale est d'environ 44 cm et la dynamique des glaces est devancée de 10 à 15 jours par rapport à celle dans le réservoir de SM-3. La période ayant l'épaisseur minimum requise pour l'accès au couvert de glace est en moyenne de 81 jours annuellement, soit très similaire à la période dans le réservoir de SM-3.

Dans le réservoir de SM-2, la faible variation du niveau d'eau ne risque pas de morceler le couvert et de créer des bandes riveraines de glace morcelée comme c'est le cas dans le réservoir de SM-3, mais il peut causer des fissures le long de la rive avec formation de « slush ».

Il est à souligner que la campagne de suivi des glaces de 2002 à 2005 a mis en évidence des faiblesses ponctuelles dans le couvert de glace au cœur de l'hiver dans les zones 4 (PK 54, 52, 49 et 47), 5 (PK 35-40) et 6 (PK 26) même si le couvert de glace formé y est stable dans son ensemble. Ces faiblesses indiquent la possibilité de la présence de chenaux où les vitesses de l'écoulement se concentrent et augmentent ainsi localement l'érosion thermique. L'opération au débit de 300 m^3/s rend les zones suivantes à risque pour la glace mince : PK 15,7 à 16, PK 18 à 23 et l'ensemble du réservoir à l'amont du PK 26,25. De plus, une réduction notable de l'épaisseur moyenne a été observée entre la période 2002-2005 et l'hiver 2024-2025 en aval de la centrale SM-3.

Le bord frontal de glace entre SM-3 et SM-2 a une dynamique particulière, à l'exception des cas avec des hivers très cléments générant peu de glace. Le bord frontal partiel se forme généralement entre les PK 22 et 47 à la fin novembre ou au début décembre et progresse en moyenne vers le PK 59 entre les mois de décembre et mars. Le bord frontal complet se forme généralement entre les PK 17 et 35 durant le mois de décembre et progresse en moyenne vers le PK 55 entre les mois de janvier et mars. Le bord frontal complet régresse vers le PK 15 entre la mi-mars et la fin avril tandis que le bord partiel régresse vers le PK 17 entre le début avril et la mi-mai.

La retenue de SM-1 et l'estuaire de la rivière (zones 7.1 et 7.2) ont une couverture de glace très instable à cause des vitesses de l'écoulement relativement élevées (>0,6 m/s) combinées à des températures de l'eau hivernales qui demeurent au-dessus du point de congélation (0,8 °C ±0,5 °C). La prise des glaces y a lieu vers la mi-janvier et le départ des glaces vers la mi-mars. L'épaisseur de glace n'atteint que 19 cm en moyenne en fin d'hiver dans les secteurs plus stables. La

couverture de glace fixe de ces zones est très sensible aux pointes de débits en provenance de SM-2 et la zone 7.2 est également sensible aux mouvements de marée et aux redoux hivernaux et printaniers. Ces phénomènes peuvent facilement réinitialiser la formation de la couverture de glace sur l'ensemble des tronçons et le couvert peut difficilement se reformer si le départ hâtif a lieu après la mi-février. La présence d'un couvert de glace peu épais le rend vulnérable à la débâcle mécanique causée par les pointes de débit.

Rappelons que l'accès au couvert de glace dans la zone d'étude reste incertain d'une année à l'autre. Dans le réservoir de SM-3 (entre les PK 85 et 135), l'accès au couvert demeure possible, mais avec certaines difficultés d'accès en rives. Dans la partie amont du réservoir de SM-2 (PK 45 à 60), le couvert n'atteint jamais l'épaisseur requise pour garantir un accès sécuritaire depuis l'hiver 2006-2007. Dans le reste du réservoir de SM-2, l'utilisation du couvert de glace est considérée possible dans certaines conditions et à certains endroits, mais plutôt difficile.

D'après la synthèse du régime des glaces, les changements hydrauliques et thermiques anticipés avec l'ajout d'un troisième groupe ainsi que selon notre expérience, on peut envisager les impacts potentiels décrits ci-après sur le régime des glaces.

- En conditions futures avec un troisième groupe, il y aura un palier de débit supplémentaire à la centrale SM-3 au débit d'équipement retenu, tout comme au PK 75 et à la centrale SM-2 grâce à l'utilisation d'un deuxième pertuis à l'évacuateur de SM-2. De plus, le démarrage des trois groupes à SM-3 risque d'augmenter le marnage dans le réservoir de SM-2;

- En conditions futures, les vitesses augmentent de 0,2 à 0,6 m/s pour le tronçon fluvial et l'entrée du réservoir de SM-2 (jusqu'au PK 60) et de 0,1 à 0,2 m/s dans le réservoir de SM-2 entre les PK 60 et 50. Les bandes riveraines avec écoulement quasi stagnant entre SM-2 et SM-1 pourraient être moins larges et le couvert de glace à cet endroit serait donc moins étendu entre les deux centrales. Le secteur estuarien en aval de SM-1 subirait, quant à lui, l'augmentation des débits issus de SM-1 en réduisant ainsi l'intrusion des courants de marée dans l'estuaire durant les périodes à forts débits;

- Le réservoir de SM-3 (zones 1 et 2) ne connaitra presque pas d'impact, car ce secteur possède une dynamique des glaces plutôt résiliente aux variations de débit et de température de l'eau. L'augmentation évaluée du marnage hivernal de 4 m dans le réservoir de SM-3 ferait augmenter la largeur de la bande de glace morcelée accompagnée de « slush » à cause des charnières le long des rives d'une dizaine de mètres pour une largeur actuelle d'une trentaine de mètres, ce qui ne devrait pas impacter significativement les utilisateurs du couvert de glace à cet endroit;

- La zone fluviale à l'aval de la centrale SM-3 et l'entrée du réservoir de SM-2 (zone 3) connaissent déjà peu d'événements de formation du couvert de glace et pourraient en

connaitre encore moins avec la hausse des débits sortants de la centrale de SM-3 durant les épisodes de pointes hivernales;

- L'amont du réservoir de SM-2 (zone 4), la retenue de SM-1 (zone 7.1) et l'estuaire de la rivière Sainte-Marguerite (zone 7.2) seraient impactés par l'augmentation des débits de pointe pouvant aller jusqu'à 500 m^3/s, même si ces pointes auront lieu sur de courtes durées et même si les températures de l'eau demeureront pratiquement inchangées. Les températures de l'eau déjà au-dessus du point de congélation à l'exutoire de SM-3 et de SM-2, combinées à des pointes de débit pouvant aller jusqu'à 500 m^3/s, risquent d'augmenter significativement le flux thermique, soit la quantité d'échanges de chaleur pouvant faire fondre une glace qui est déjà très instable en conditions actuelles. Les épaisseurs de glace sur les courts tronçons qui demeureront couverts de glace pourraient demeurer faibles avec possiblement des éclaircies entre les PK 47 et 54 tout au long de l'hiver. Les pointes de débit en présence d'un couvert de glace mince pourraient également causer une débâcle mécanique de la couverture de glace tel qu'observé en aval de certaines centrales hydroélectriques. En conditions actuelles, aucun accès au couvert de glace n'est possible dans la partie amont du réservoir de SM-2 et entre la centrale SM-2 et l'estuaire. Cette situation persistera donc en conditions futures avec l'ajout d'un troisième groupe à SM-3;

- Le tronçon intermédiaire du réservoir de SM-2 (zone 5) est probablement le tronçon qui sera exposé aux plus grands changements du régime des glaces. Ce tronçon est déjà touché par les conditions hydrauliques et thermiques actuelles qui ne favorisent pas l'épaississement de la glace qui comporte plusieurs éclaircies. Les pointes de débit en conditions futures avec le troisième groupe risquent d'augmenter la superficie des éclaircies observées et d'en créer d'autres. Les épaisseurs de glace en amont et en aval des éclaircies pourraient demeurer faibles tout au long de l'hiver. Les pointes de débit en présence d'un couvert de glace mince pourraient également causer une débâcle mécanique de la couverture de glace sur certains tronçons. Ces impacts potentiels sur la glace pourraient réduire la durée de la période ayant l'épaisseur minimum requise pour l'accès au couvert de glace ainsi que les tronçons possiblement praticables en plus d'augmenter le nombre et l'étendue des zones fragilisées et non sécuritaires;

- La partie aval du réservoir de SM-2 (zone 6) sera moins impactée que le reste du réservoir, car ce secteur a une dynamique des glaces plus résiliente aux variations de débit et de température de l'eau. Toutefois, de très faibles épaisseurs de glace ont été relevées durant l'ensemble des campagnes de mesures. De plus, l'épaisseur de glace moyenne en février a significativement diminué entre la période 2002-2005 et l'hiver 2024 2025, ce qui est en partie causé par l'ajout du deuxième groupe à la centrale SM-3. Ceci indique que cette zone pourrait se retrouver avec plus de petites éclaircies dans le futur et davantage de faiblesses dans la couverture de glace. L'accès au couvert de glace sera donc impacté par l'augmentation des faiblesses, mais il est difficile de quantifier précisément cet impact. De plus, l'apparition de

nouvelles faiblesses est un enjeu plus sévère que les éclaircies pour la sécurité des utilisateurs du couvert car ces faiblesses ne sont pas apparentes, contrairement aux éclaircies;

- Dans le réservoir de SM-2, le marnage pourra probablement faire fissurer le couvert de glace le long des rives de manière systématique, soit pour des épaisseurs de glace inférieures à 0,8 m. Il y aura donc un impact de l'ajout d'un troisième groupe sur la fissuration de la glace en berge et les étendues des bandes de « slush » le long des rives. Il est ainsi possible d'affirmer que l'accès au couvert de glace dans les parties intermédiaire et aval du réservoir de SM-2 (zones 5 et 6) sera plus difficile en conditions futures qu'en conditions actuelles.

Finalement, dans le cas où les modifications à l'exploitation de la centrale SM-3 n'auraient pas d'effets sur les conditions hydrauliques et thermiques de la zone étudiée, le régime des glaces pourrait aussi être modifié par le réchauffement de la température de l'air lié aux changements climatiques.

RÉFÉRENCES

Carter Consultants. (2003). *Guide pratique pour le calcul des forces exercées par la glace.* Québec.

Groupe Conseil LaSalle. (2000). *Stabilité des couverts de glace soumis aux fluctuations de débit (R.1403).*

Hydro-Québec. (1991). *Aménagement hydroélectrique Sainte-Marguerite-3 - Rapport d'avant-projet (Partie 5 : Impacts sur le milieu).* Hydro-Québec.

Hydro-Québec. (2001). *Suréquipement de la centrale de la Sainte-Marguerite 3.* Hydro-Québec.

Hydro-Québec. (2002). *Effet de l'ajout du troisième groupe sur le régime thermique de l'eau à l'aval de SM-3* . Conception des aménagements de production, Hydraulique et Géotechnique.

Hydro-Québec. (2020). *Liste des centrales privées raccordées au réseau d'Hydro-Québec.* Hydro-Québec.

Hydro-Québec. (2023). *Vers un Québec décarboné et prospère - Plan d'action 2035.* Hydro-Québec.

Innergex. (2024, 06 25). *Site SM-1*. Récupéré sur Innergex: https://www.innergex.com/fr/installations/sm-1

Lasalle|NHC. (2024). *Centrale SM-3 : Ajout du 3e groupe - Étude du régime thermique - Avis technique, analyse des données disponibles et approches possibles.* Montréal: Lasalle|NHC.

Lasalle|NHC. (2025). *Ajout d'un troisième groupe turbine-alternateur à la centrale Sainte-Marguerite - Étude des conditions hydrauliques en rivière - Tronçon SM-1-SM-2 – 60%.*

Lasalle|NHC. (2025). *Ajout d'un troisième groupe turbine-alternateur à la centrale SM-3 - Étude des conditions hydrauliques en rivière – Tronçon de la centrale SM-3 à PK 50.*

NASA. (2025). *Worldview*. Récupéré sur EOSDIS Worldview: https://worldview.earthdata.nasa.gov/

Sinergise Solutions d.o.o. (2025). *EO Browser*. Récupéré sur Sentinel Hub: https://www.sentinel-hub.com/explore/eobrowser/

Swiss federal authorities. (2024, 07 10). *Federal Office of Meteorology and Climatology MeteoSwiss*. Récupéré sur https://www.meteoswiss.admin.ch/weather/weather-and-climate-from-a-to-z/temperature/decreases-in-temperature-with-altitude.html#:~:text=As%20altitude%20increases%2C%20temperature%20decreases,%C2%B0C%20per%20100%20metres.

WSP. (2025). *Suréquipement de la centrale Sainte-Marguerite-3 - Étude de l'impact sur l'environnement - Rapport sectoriel sur le milieu humain allochtone (Version finale, Rév. 0).*

ANNEXE A – DOSSIER PHOTOGRPHIQUE DES SUIVIS DE GLACE

A.1 Réservoir SM-3

Dans le réservoir de SM-3, la Figure A.1 et la Figure A.2 montrent les images des survols héliportés pour la zone 1 pour les hivers 2023-2024 et 2024-2025. Des images sont présentées de la Figure A.3 à la Figure A.5 pour la zone 2 les hivers 2003-2004, 2023-2024 et 2024-2025.



(a) 20 décembre 2023



(b) 27 février 2024

Figure A.1 Survols hiver 2023-2024 – Zone 1 (Réservoir intermédiaire SM-3, PK 115)



(a) 21 janvier 2025



(b) 4 février 2025

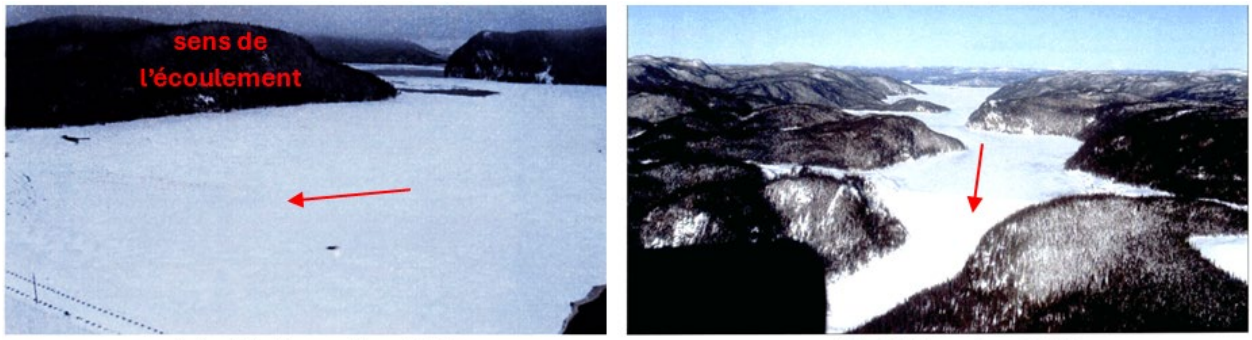


(c) 19 février 2025



(d) 3 mars 2025

Figure A.2 Survols hiver 2024-2025 – Zone 1 (Réservoir intermédiaire SM-3, PK 105)



(a) 17 décembre 2003 (b) 21 janvier 2004

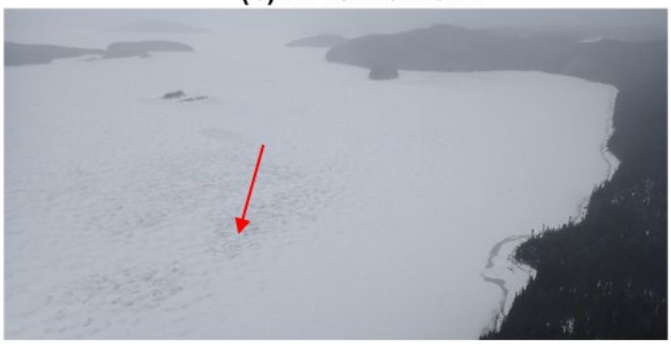
Figure A.3 Survols hiver 2003-2004 – Zone 2 (Champ proche barrage SM-3, PK 90)



(a) 20 décembre 2023



(b) 27 février 2024



(c) 23 avril 2024

Figure A.4 Survols hiver 2023-2024 – Zone 2 (Champ proche barrage SM-3, PK 97)

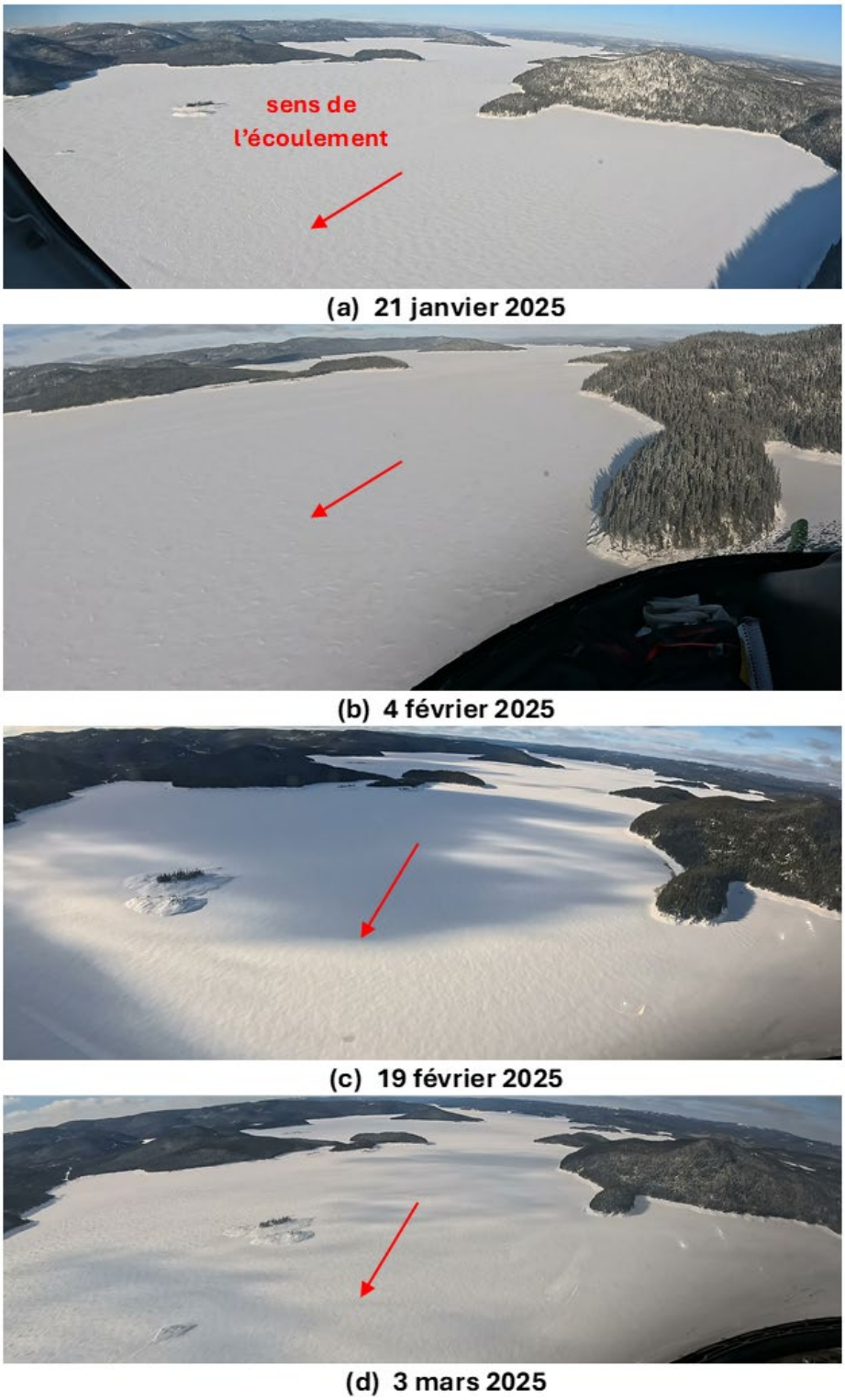
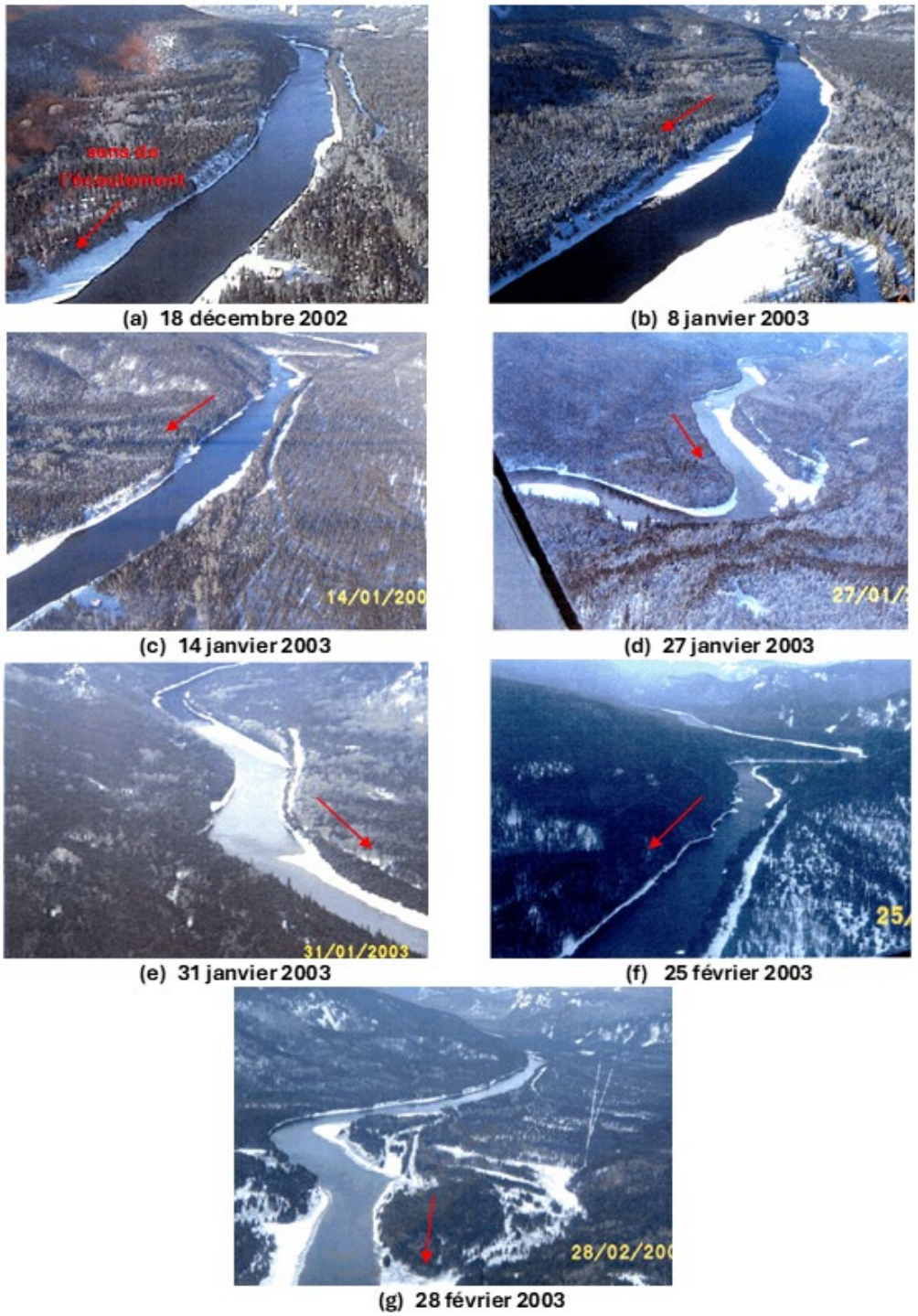


Figure A.5 Survols hiver 2024-2025 – Zone 2 (Champ proche barrage SM-3, PK 97)

A.2 Tronçon entre les centrales SM-3 et SM-2

Les images de survols héliportés dans la zone 3 sont présentées de la Figure A.6 à la Figure A.10.



(a) 18 décembre 2002
(b) 8 janvier 2003
(c) 14 janvier 2003
(d) 27 janvier 2003
(e) 31 janvier 2003
(f) 25 février 2003
(g) 28 février 2003

Figure A.6 Survols hiver 2002-2003 – Zone 3 (Tronçon SM-3/SM-2, PK 68)

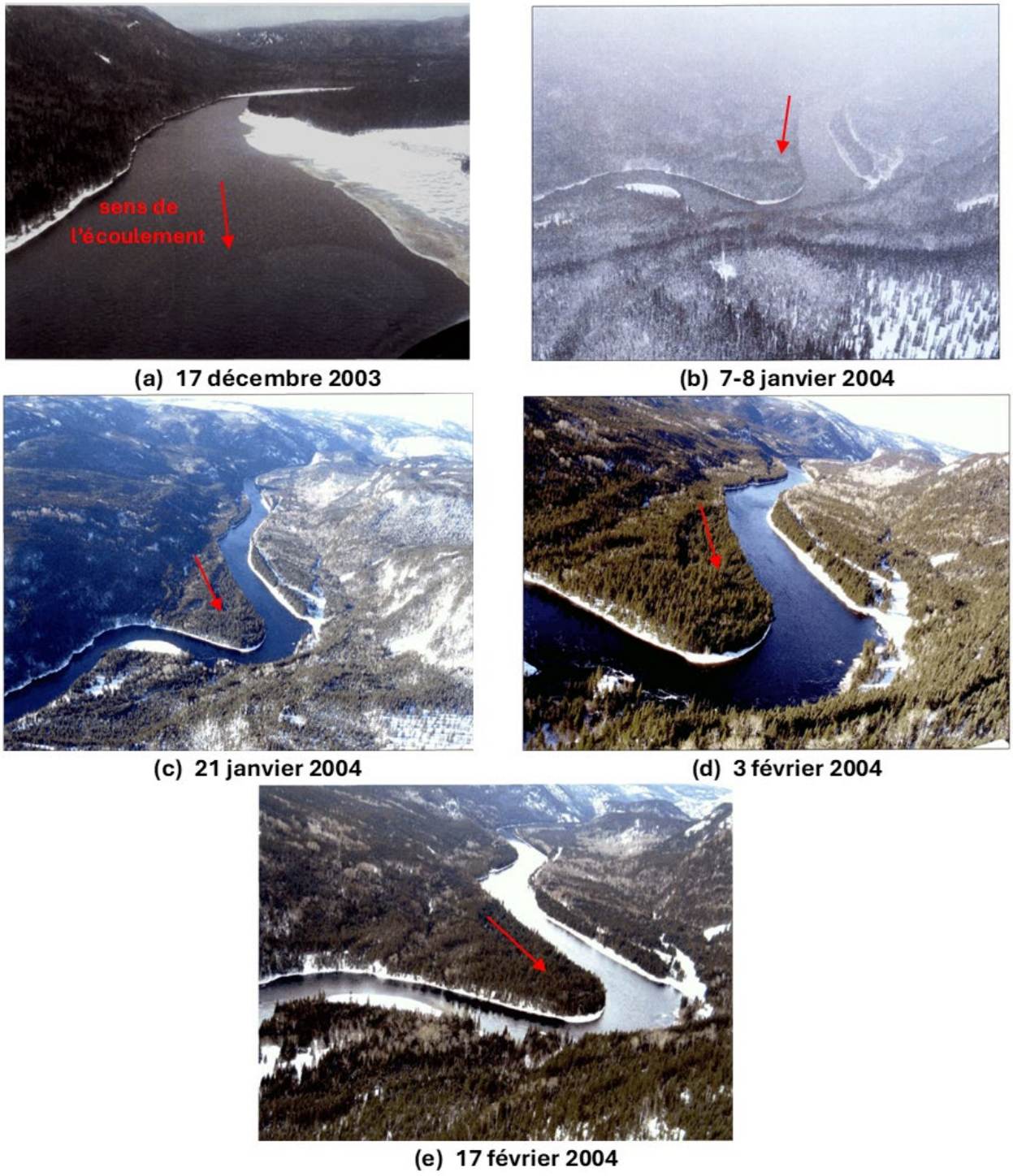


Figure A.7 Survols hiver 2003-2004 – Zone 3 (Tronçon SM-3/SM-2, PK 68)

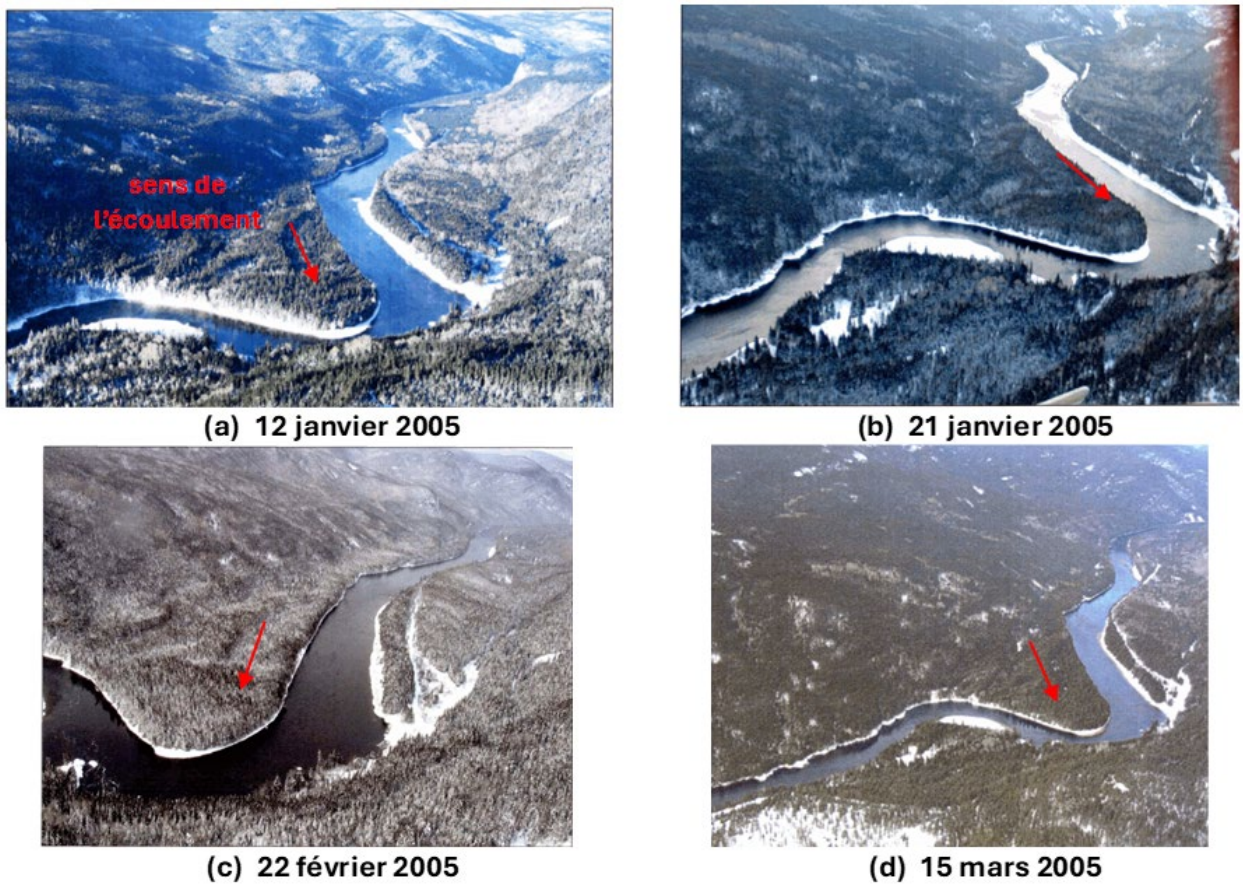


Figure A.8 Survols hiver 2004-2005 – Zone 3 (Tronçon SM-3/SM-2, PK 68)

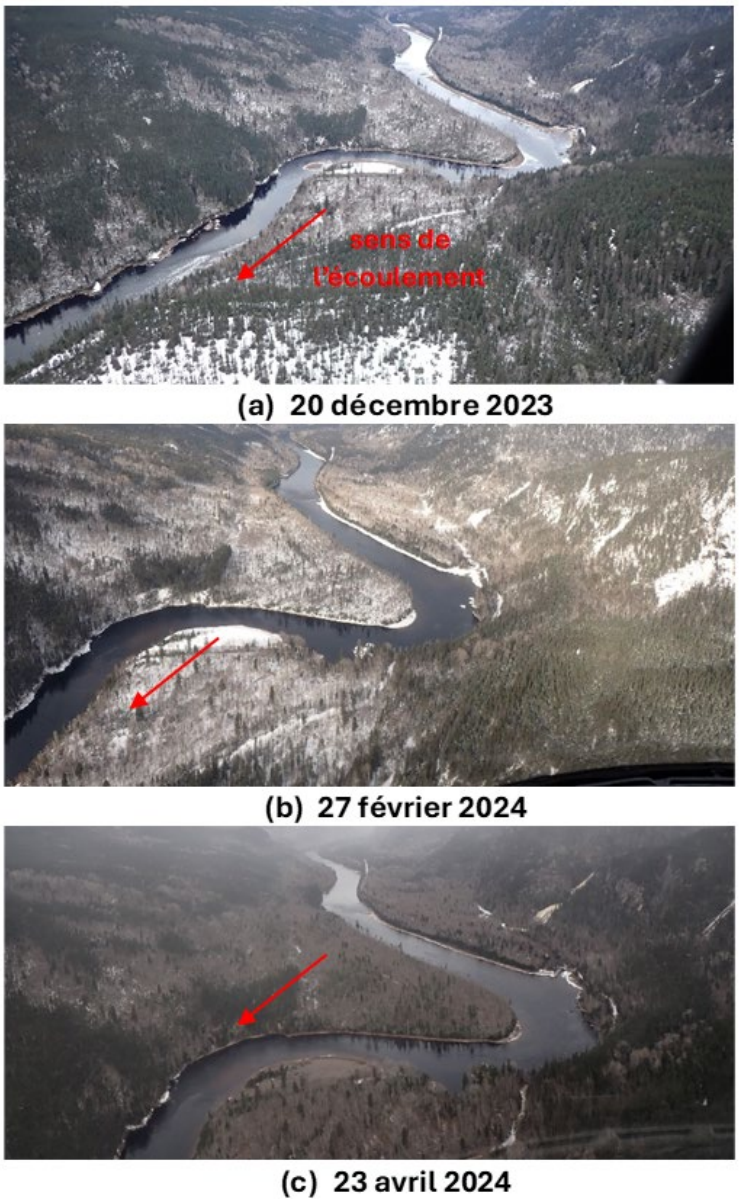


Figure A.9 Survols hiver 2023-2024 – Zone 3 (Tronçon SM-3/SM-2, PK 68)



(a) 21 janvier 2025



(b) 4 février 2025



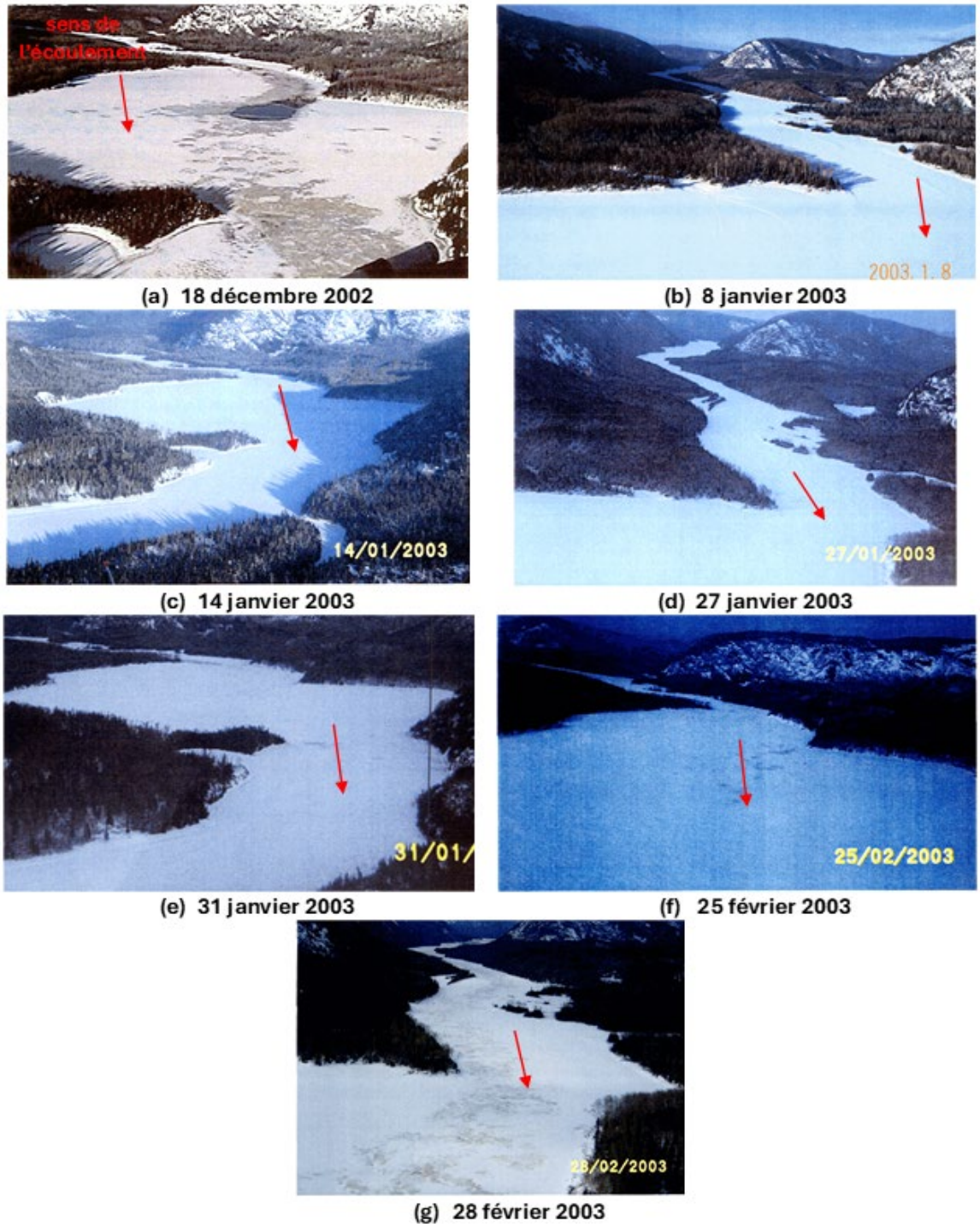
(c) 19 février 2025



(d) 3 mars 2025

Figure A.10 Survols hiver 2024-2025 – Zone 3 (Tronçon SM-3/SM-2, PK 68)

Les images de survols héliportés sont montrées de la Figure A.11 à la Figure A.15 pour la zone 4 et de la Figure A.16 à la Figure A.20 pour la zone 5. Pour la zone 6, les images de survols héliportés sont montrées de la Figure A.21 à la Figure A.25.



(a) 18 décembre 2002
(b) 8 janvier 2003
(c) 14 janvier 2003
(d) 27 janvier 2003
(e) 31 janvier 2003
(f) 25 février 2003
(g) 28 février 2003

Figure A.11 Survols hiver 2002-2003 – Zones 4 (Tronçon SM-3/SM-2, PK 52)

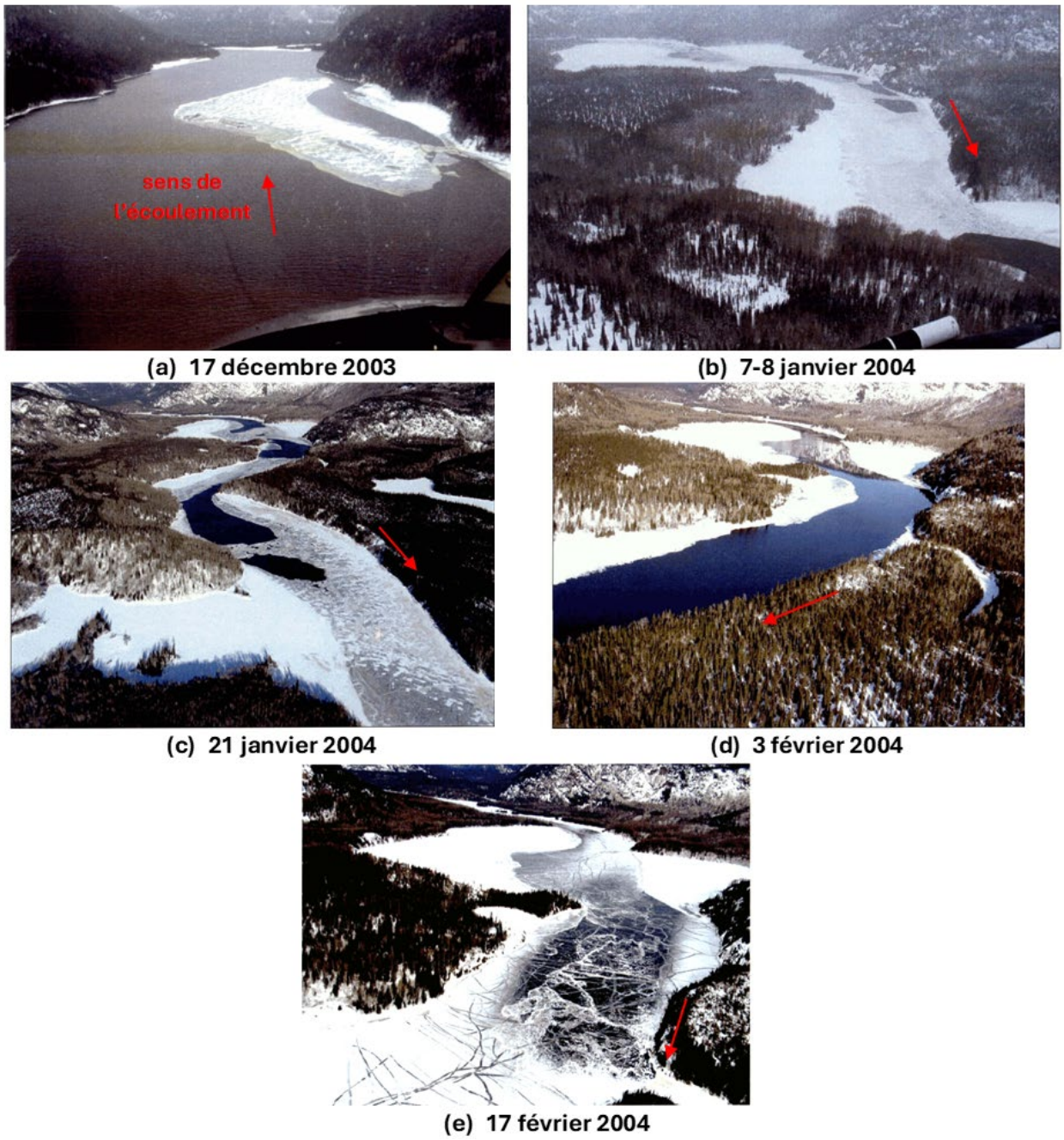


Figure A.12 Survols hiver 2003-2004 – Zones 4 (Tronçon SM-3/SM-2, PK 52)

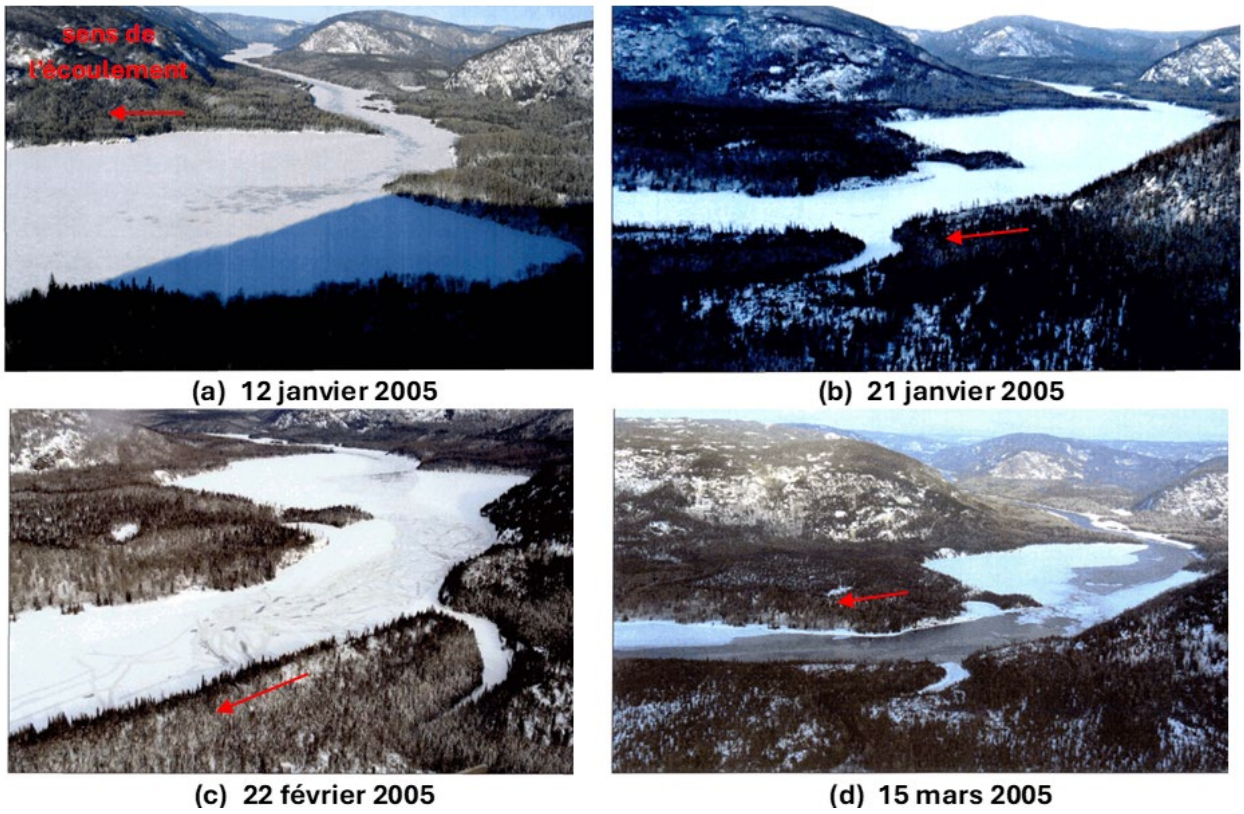


Figure A.13 Survols hiver 2004-2005 – Zones 4 (Tronçon SM-3/SM-2, PK 52)



(a) 20 décembre 2023



(b) 27 février 2024



(c) 23 avril 2024

Figure A.14 Survols hiver 2023-2024 – Zones 4 (Tronçon SM-3/SM-2, PK 52)



(a) 21 janvier 2025



(b) 4 février 2025

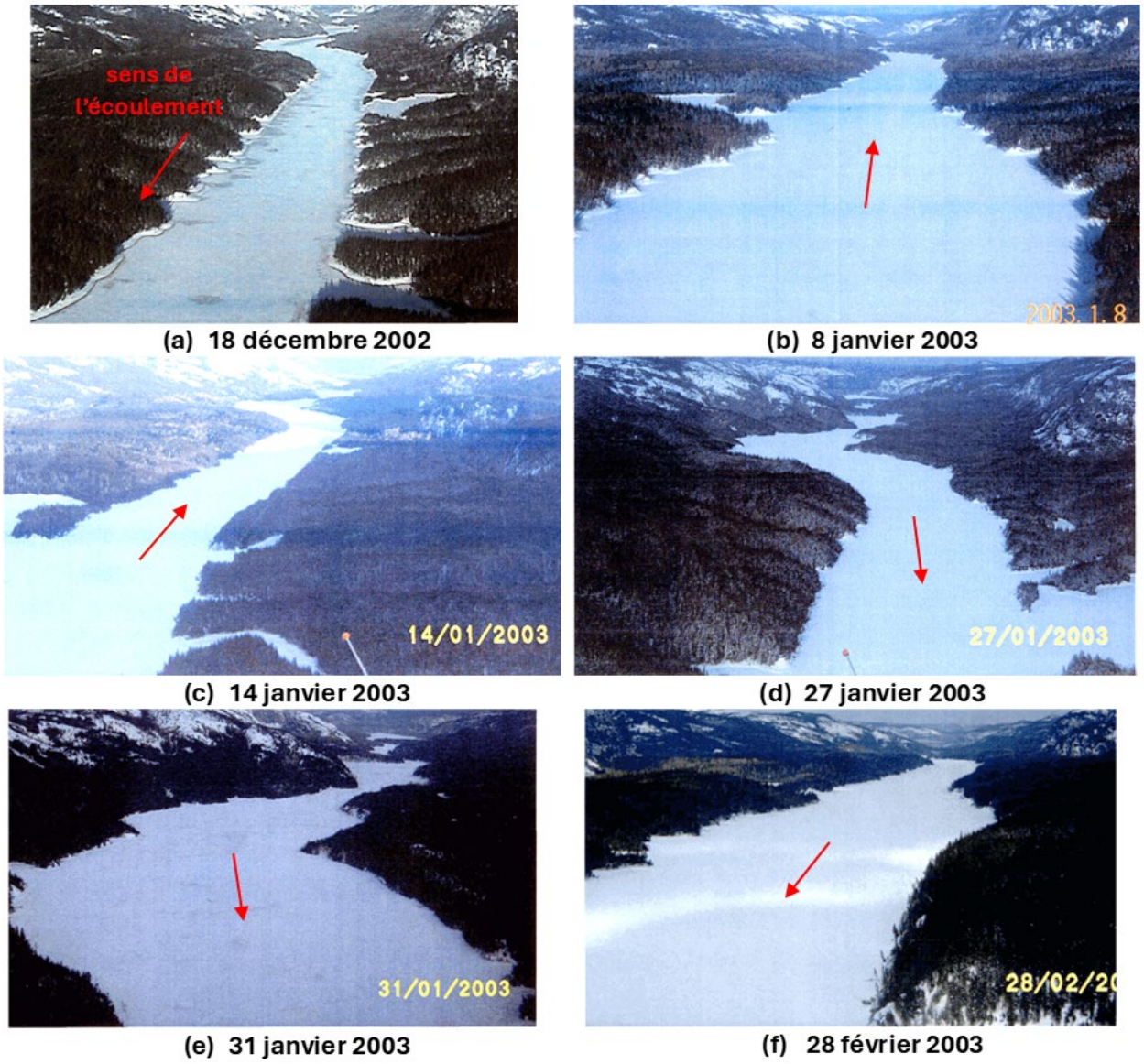


(c) 19 février 2025



(d) 3 mars 2025

Figure A.15 Survols hiver 2024-2025 – Zones 4 (Tronçon SM-3/SM-2, PK 52)



(a) 18 décembre 2002
(b) 8 janvier 2003
(c) 14 janvier 2003
(d) 27 janvier 2003
(e) 31 janvier 2003
(f) 28 février 2003

Figure A.16 Survols hiver 2002-2003 – Zone 5 (Tronçon SM-3/SM-2, PK 33)

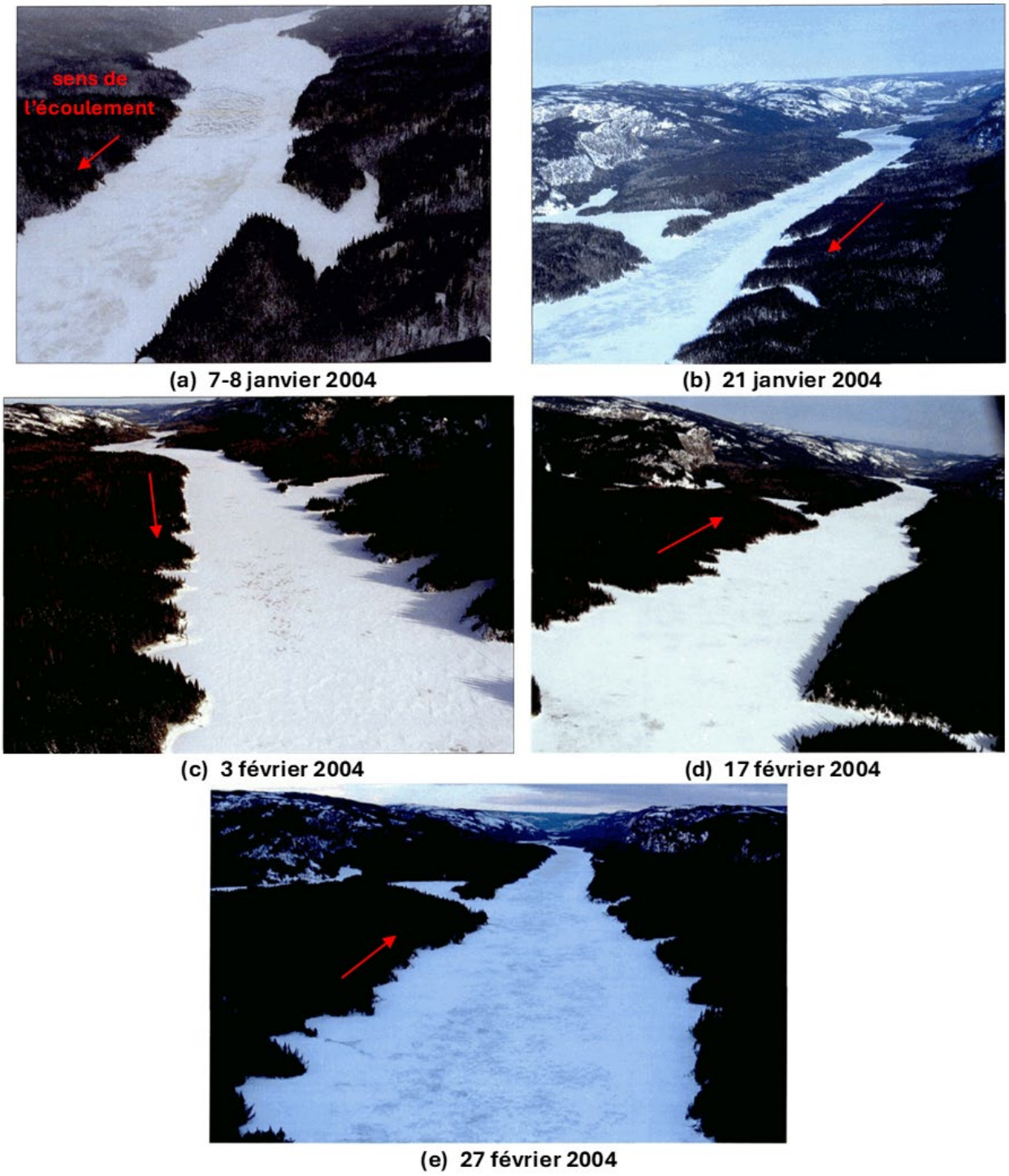


Figure A.17 Survols hiver 2003-2004 – Zone 5 (Tronçon SM-3/SM-2, PK 33)

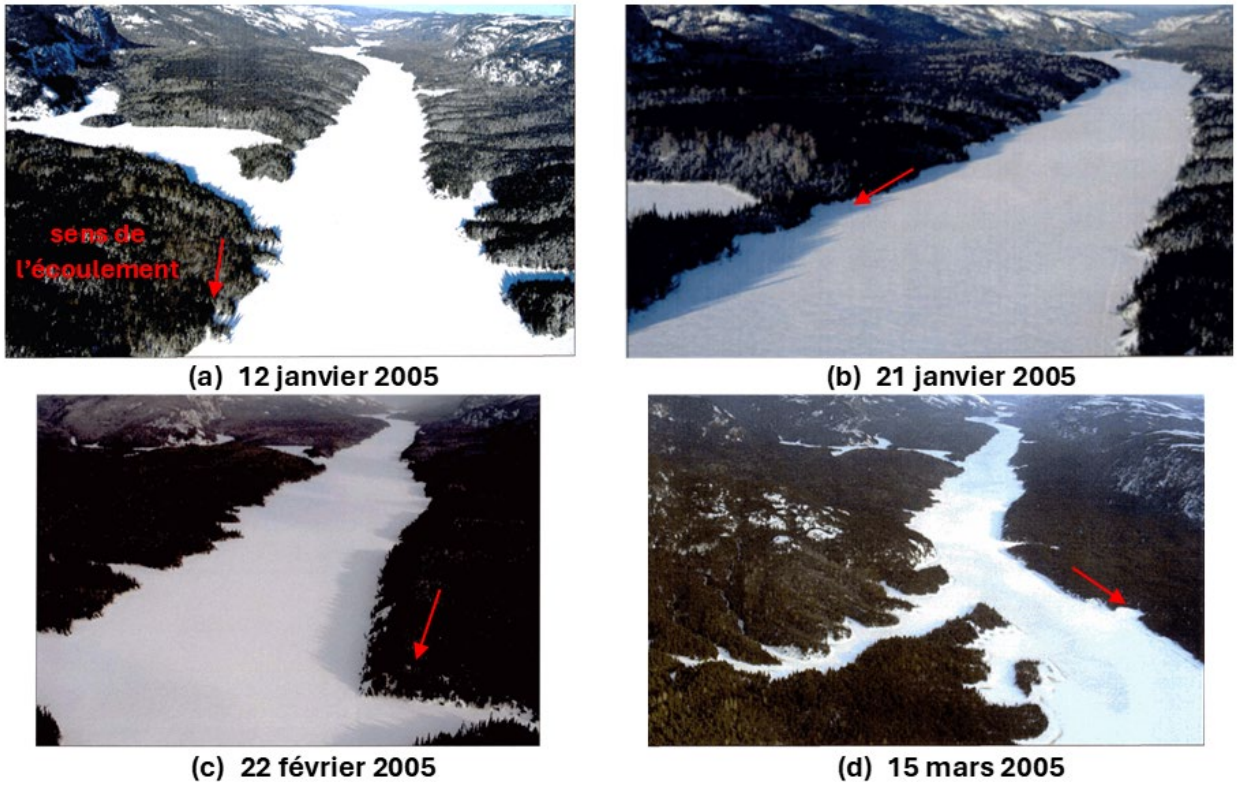


Figure A.18 Survols hiver 2004-2005 – Zone 5 (Tronçon SM-3/SM-2, PK 33)

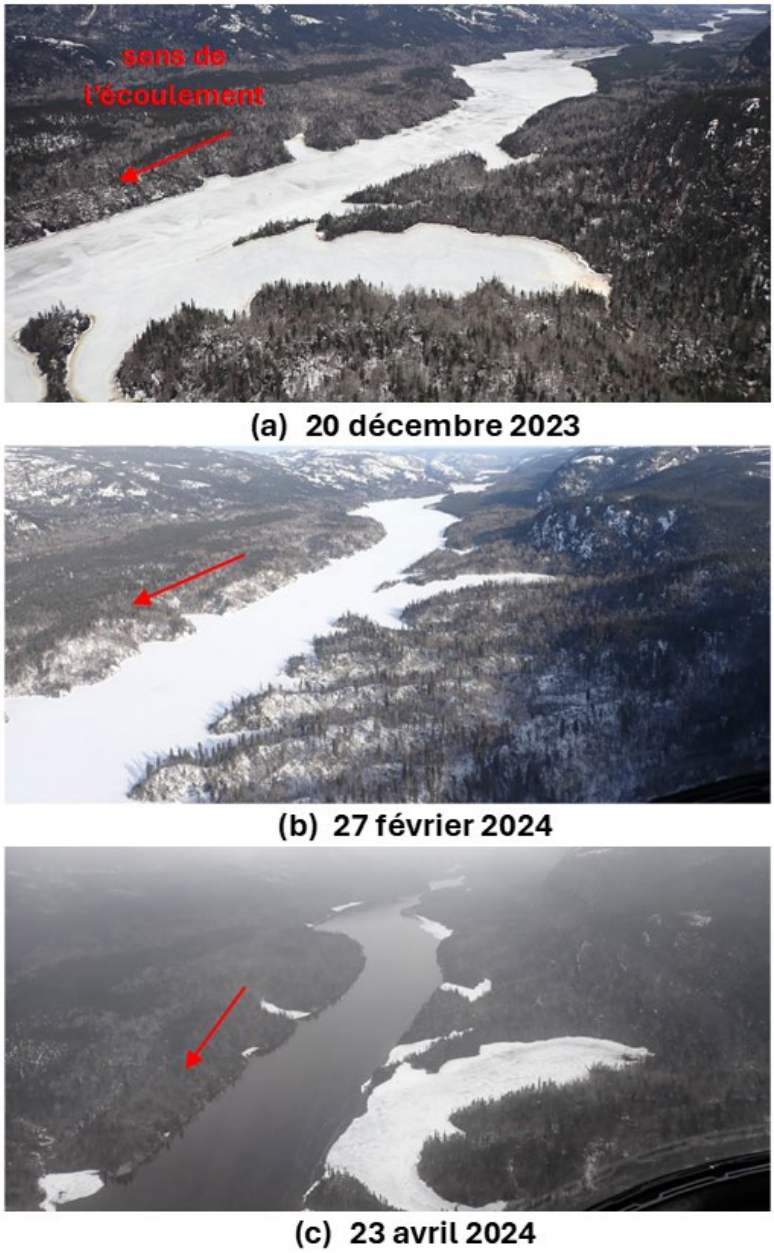


Figure A.19 Survols hiver 2023-2024 – Zone 5 (Tronçon SM-3/SM-2, PK 34)



(a) 21 janvier 2025



(b) 4 février 2025

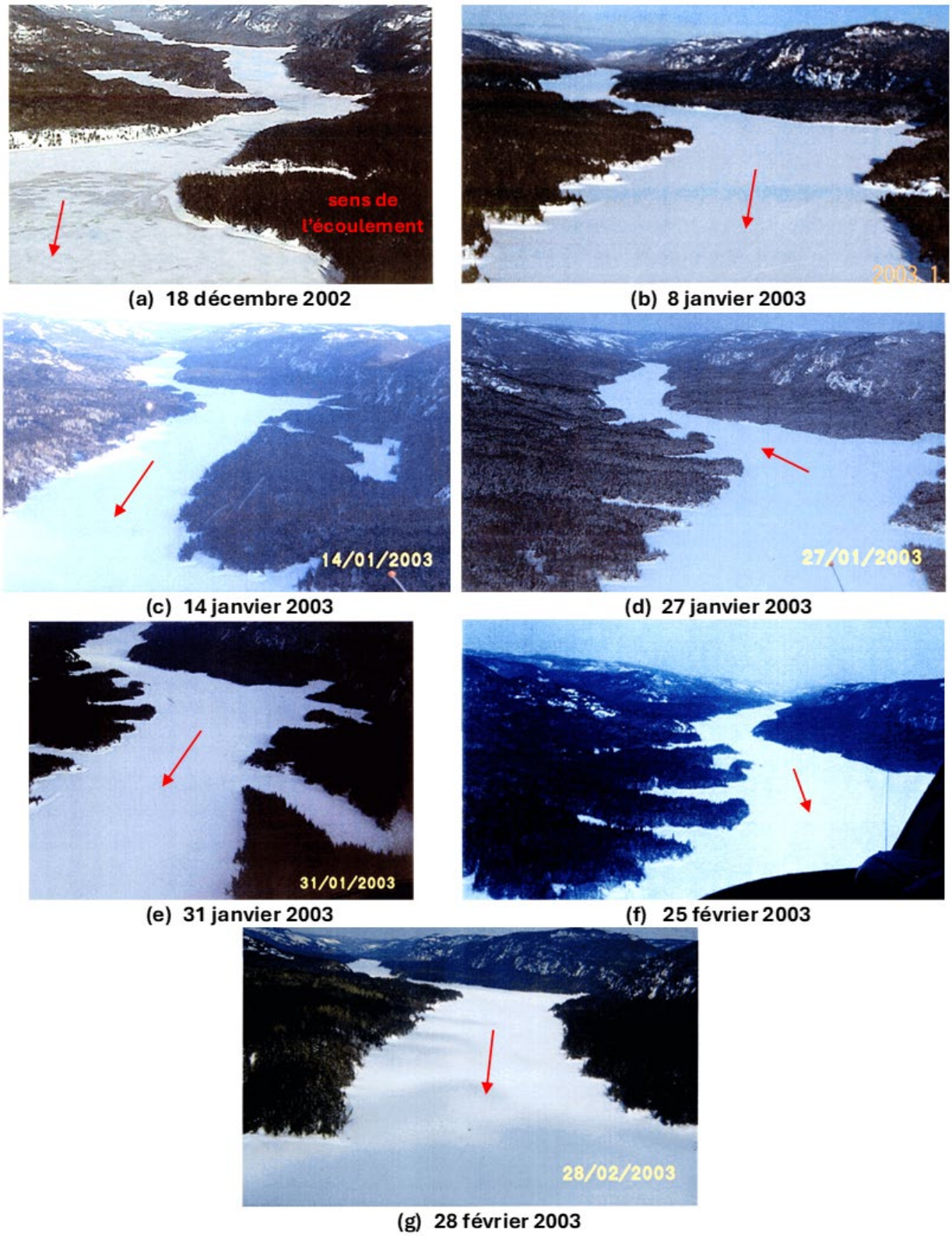


(c) 19 février 2025



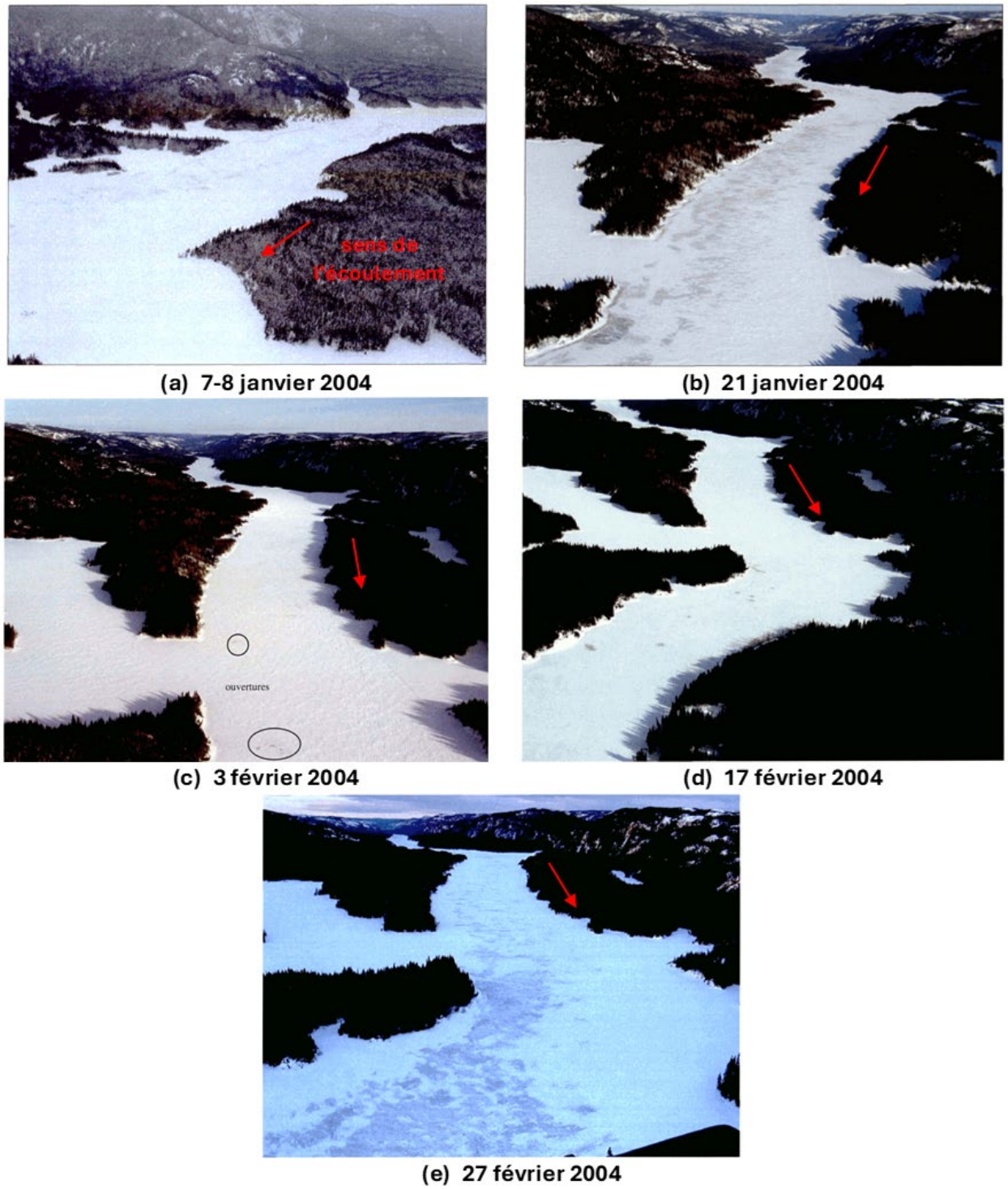
(d) 3 mars 2025

Figure A.20 Survols hiver 2024-2025 – Zone 5 (Tronçon SM-3/SM-2, PK 34)



(a) 18 décembre 2002
(b) 8 janvier 2003
(c) 14 janvier 2003
(d) 27 janvier 2003
(e) 31 janvier 2003
(f) 25 février 2003
(g) 28 février 2003

Figure A.21 Survols hiver 2002-2003 – Zone 6 (Tronçon SM-3/SM-2, PK 28)



(a) 7-8 janvier 2004

(b) 21 janvier 2004

(c) 3 février 2004

(d) 17 février 2004

(e) 27 février 2004

Figure A.22 Survols hiver 2003-2004 – Zone 6 (Tronçon SM-3/SM-2, PK 28)

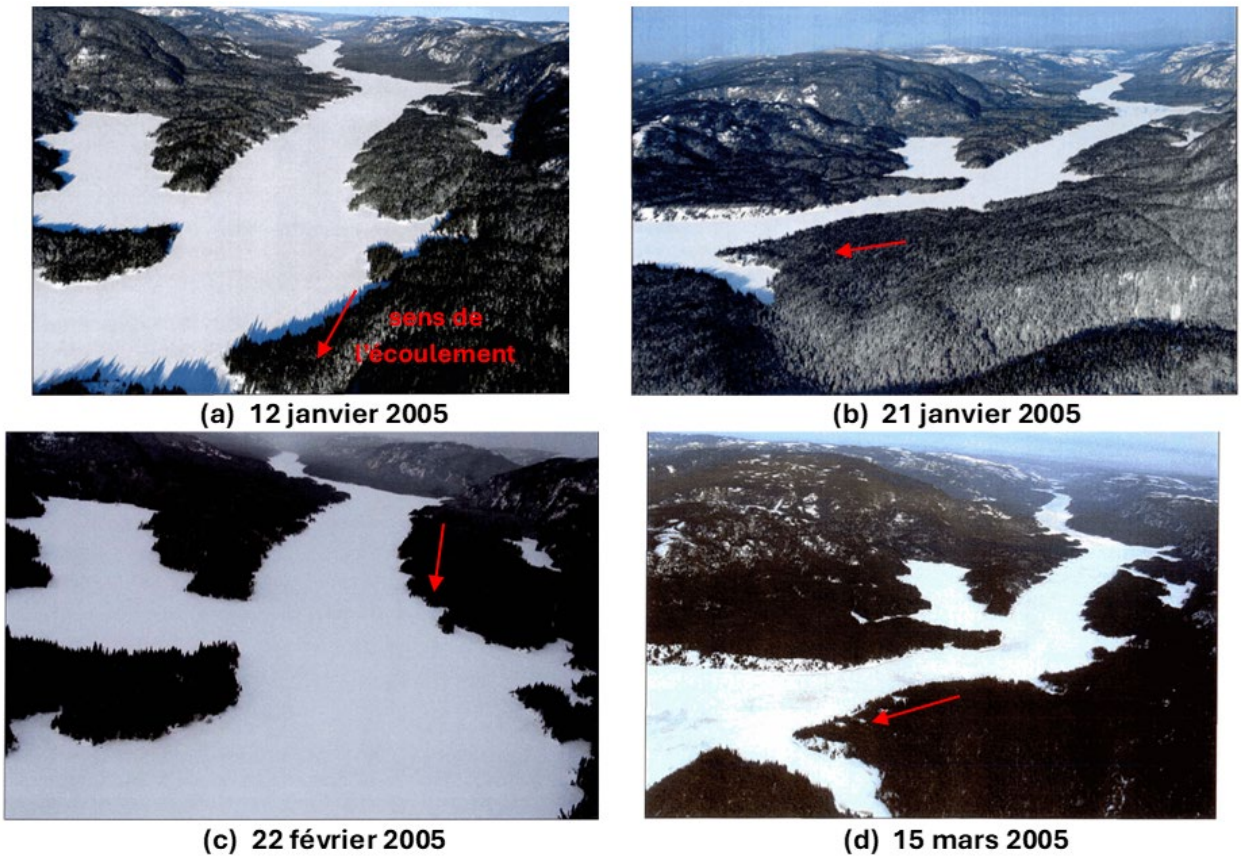


Figure A.23 Survols hiver 2004-2005 – Zone 6 (Tronçon SM-3/SM-2, PK 28)



(a) 20 décembre 2023

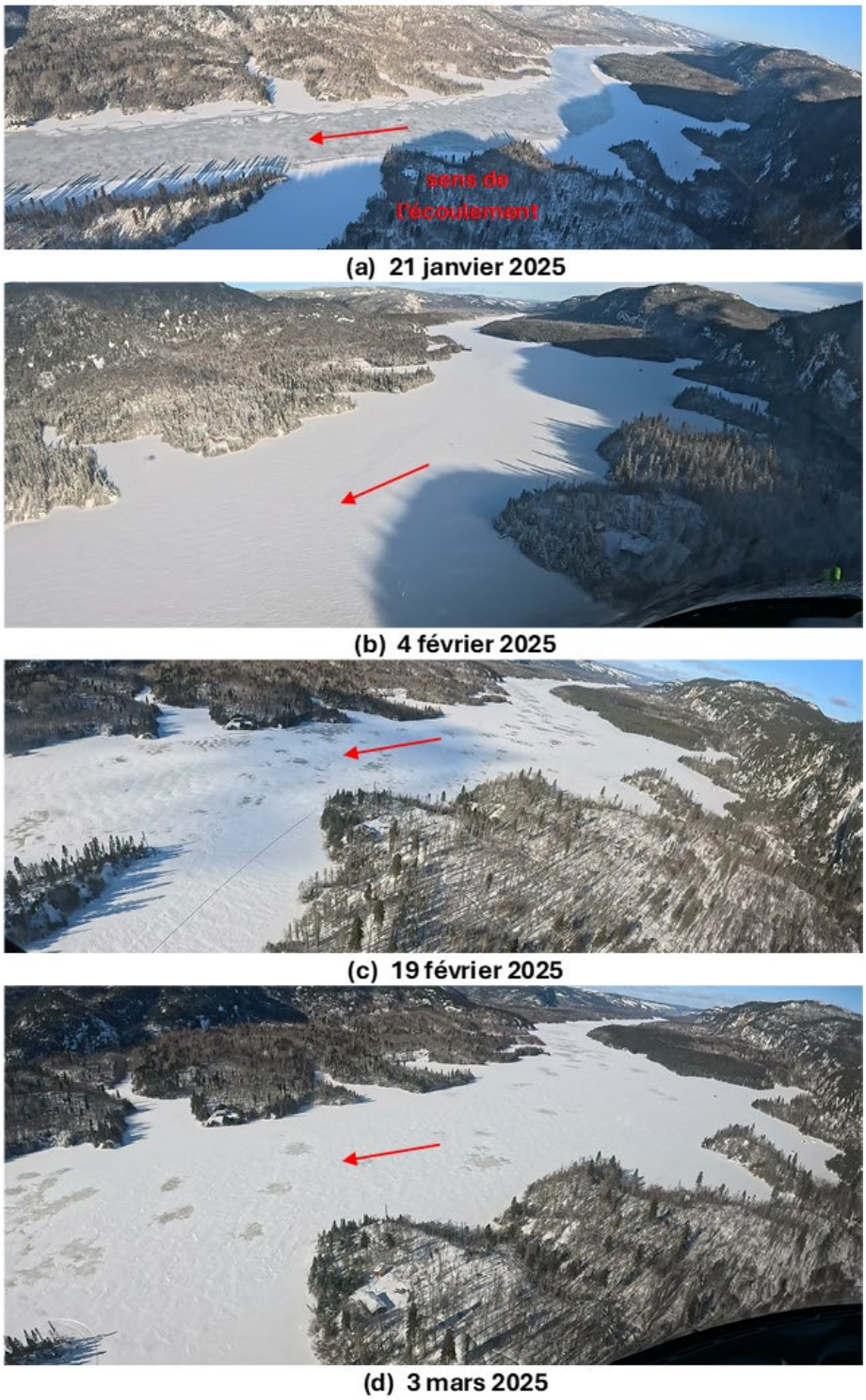


(b) 27 février 2024



(c) 23 avril 2024

Figure A.24 Survols hiver 2023-2024 – Zone 6 (Tronçon SM-3/SM-2, PK 28)



(a) 21 janvier 2025

(b) 4 février 2025

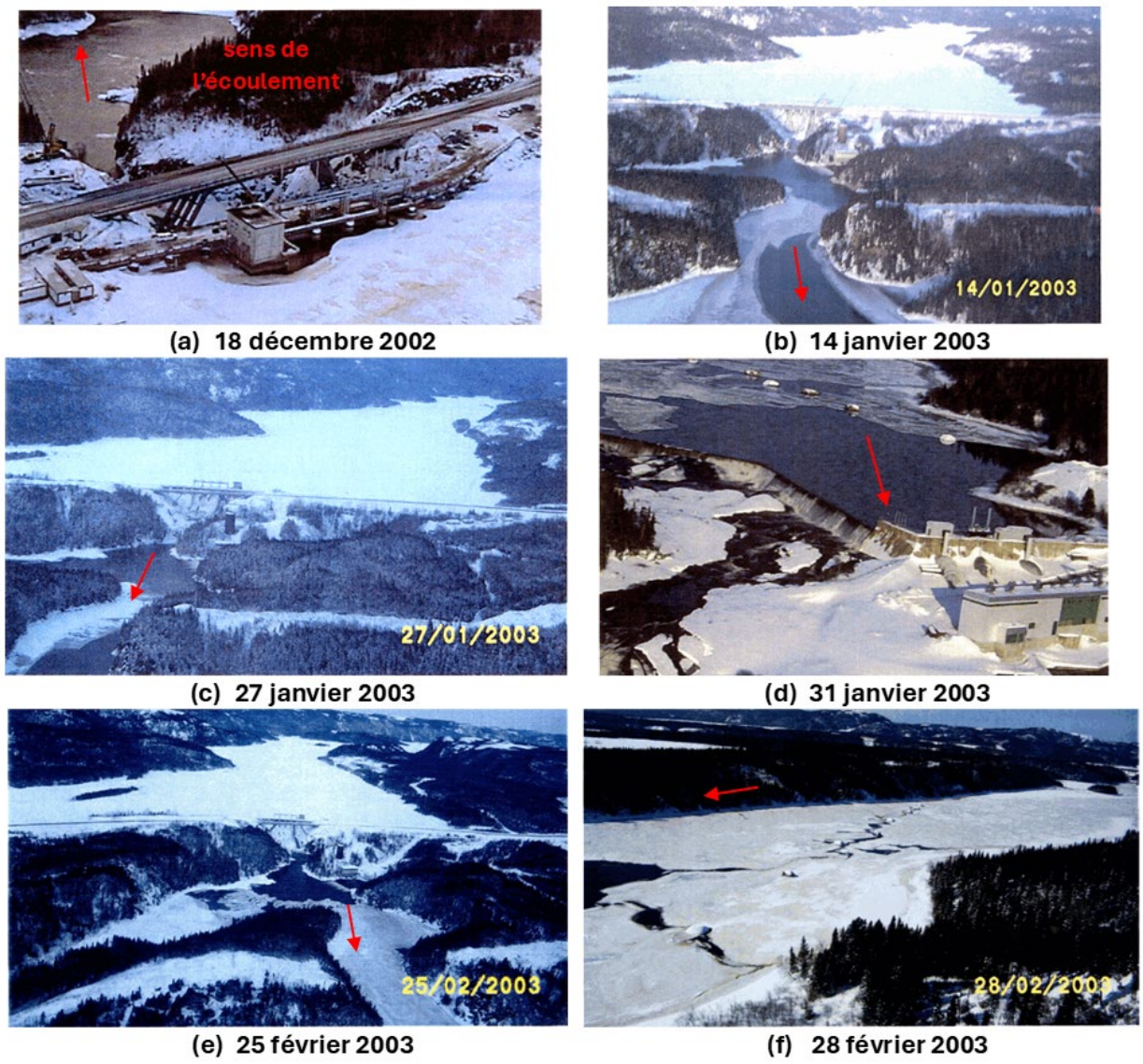
(c) 19 février 2025

(d) 3 mars 2025

Figure A.25 Survols hiver 2024-2025 – Zone 6 (Tronçon SM-3/SM-2, PK 28)

A.3 Retenue de SM-1

Pour la retenue de SM-1 (zone 7.1), les images de survols héliportés sont montrées de la Figure A.26 à la Figure A.30.



(a) 18 décembre 2002 (b) 14 janvier 2003

(c) 27 janvier 2003 (d) 31 janvier 2003

(e) 25 février 2003 (f) 28 février 2003

Figure A.26 Survols hiver 2002-2003 – Zone 7.1 (Tronçon SM-2/SM-1, PK 9,5)



7-8 janvier 2004

Figure A.27 Survol hiver 2003-2004 – Zone 7.1 (Tronçon SM-2/SM-1, PK 8)



(a) 12 janvier 2005



(b) 21 janvier 2005



(c) 22 février 2005



(d) 15 mars 2005

Figure A.28 Survols hiver 2004-2005 – Zone 7.1 (Tronçon SM-2/SM-1, PK 8)



(a) 20 décembre 2023

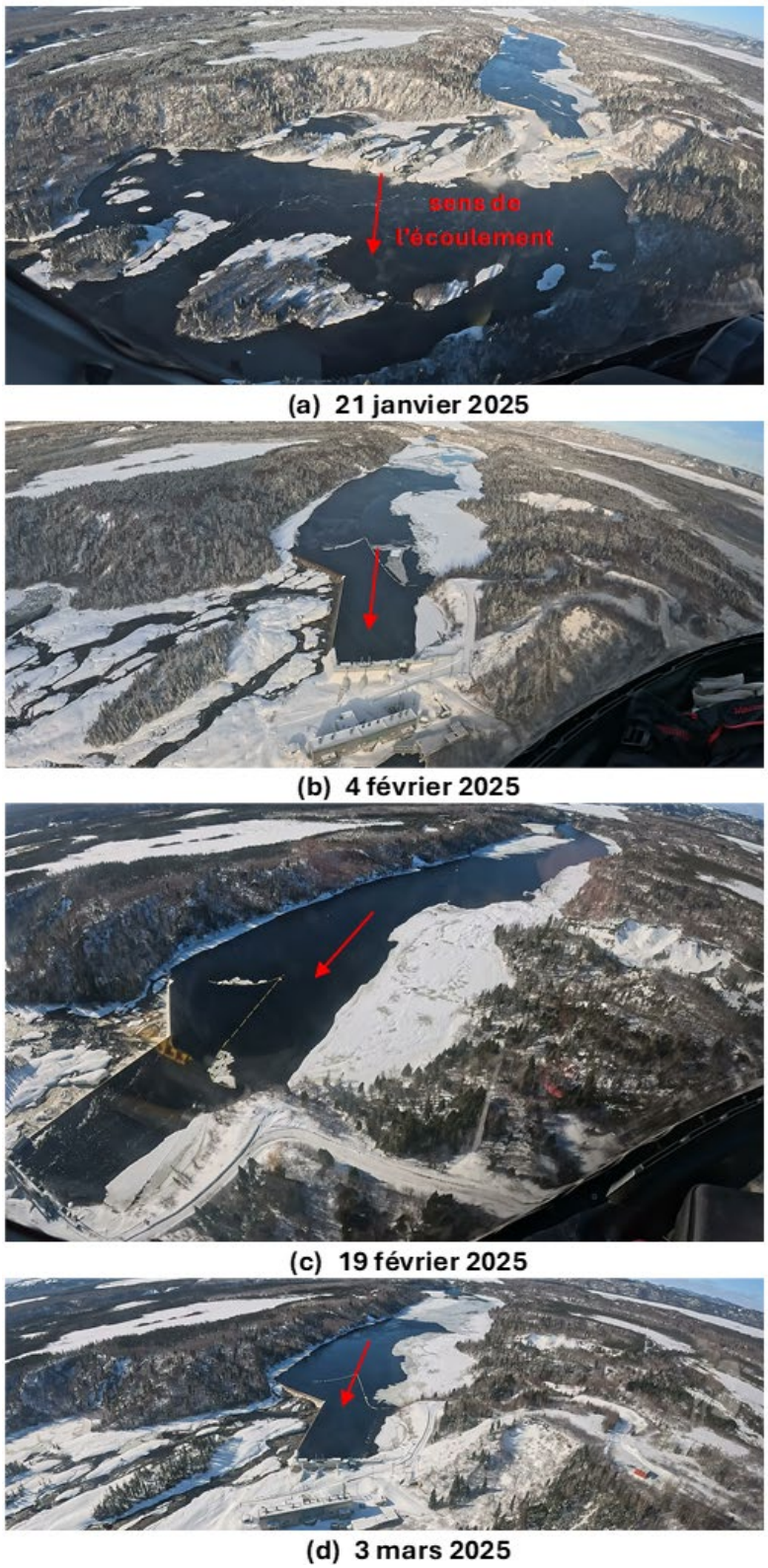


(b) 27 février 2024



(c) 23 avril 2024

Figure A.29 Survols hiver 2023-2024 – Zone 7.1 (Tronçon SM-2/SM-1, PK 8)



(a) 21 janvier 2025

(b) 4 février 2025

(c) 19 février 2025

(d) 3 mars 2025

Figure A.30 Survols hiver 2024-2025 – Zone 7.1 (Tronçon SM-2/SM-1, PK 8)

A.4 Estuaire de la rivière Sainte-Marguerite

Pour la zone estuarienne (zone 7.2), les images de survols héliportés sont montrées de la Figure A.31 à la Figure A.35.



(a) 31 janvier 2003 (b) 28 février 2003

Figure A.31 Survols hiver 2002-2003 – Zone 7.2 (Tronçon estuarien, PK 5)



7-8 janvier 2004

Figure A.32 Survol hiver 2003-2004 – Zone 7.2 (Tronçon estuarien, PK 5)

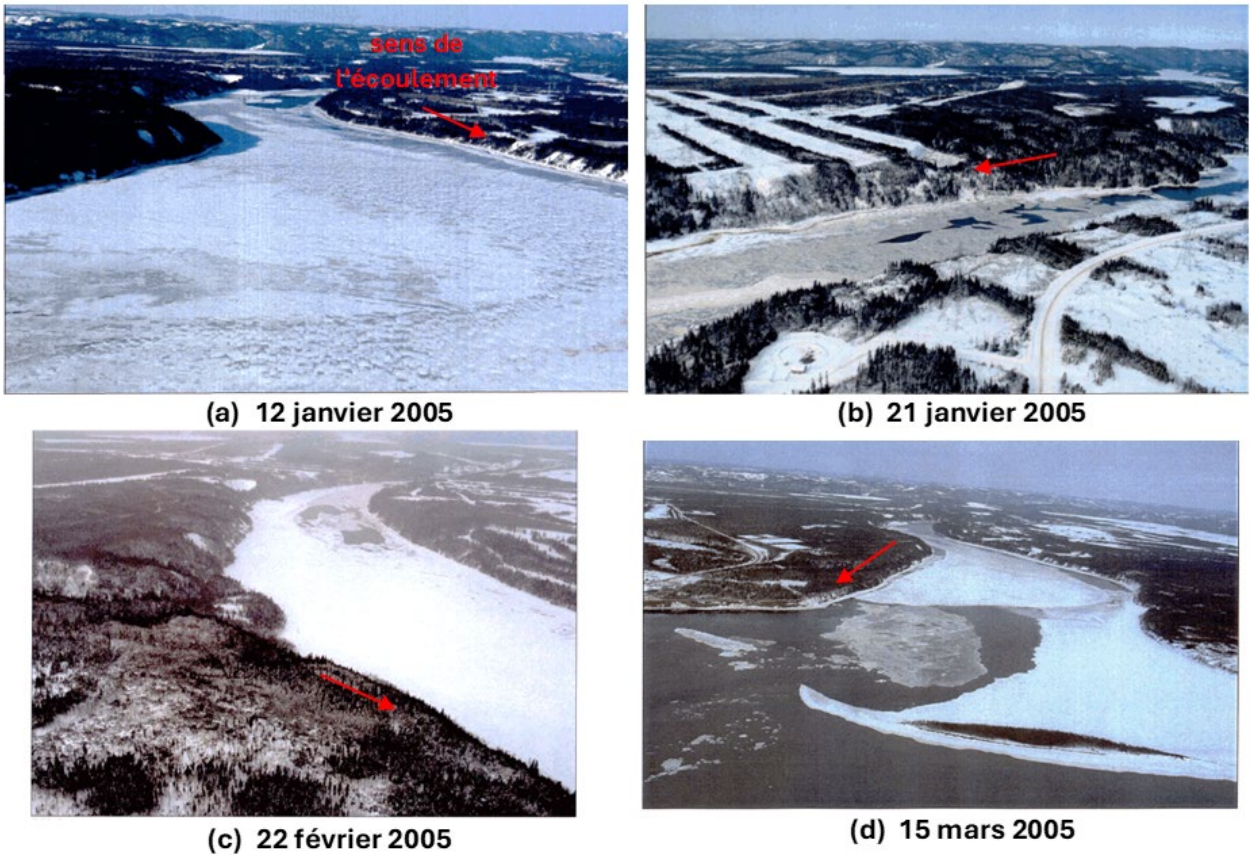


Figure A.33 Survols hiver 2004-2005– Zone 7.2 (Tronçon estuarien, PK 0-6)

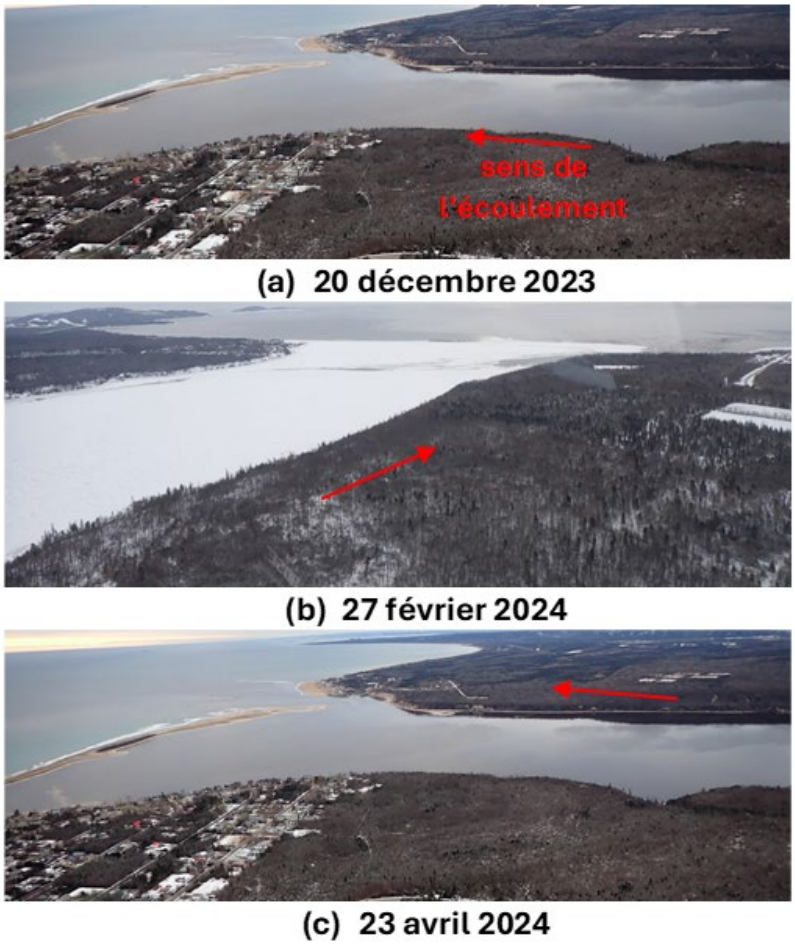


Figure A.34 Survols hiver 2023-2024 – Zone 7.2 (Tronçon estuarien, PK 2)



(a) 21 janvier 2025



(b) 4 février 2025



(c) 19 février 2025



(d) 3 mars 2025

Figure A.35 Survols hiver 2024-2025 – Zone 7.2 (Tronçon estuarien, PK 2)