

Année universitaire 2025-2026

Master 1<sup>ère</sup> année  Master 2<sup>ème</sup> année

Master STAPS mention : *Entraînement et Optimisation de la Performance Sportive*

Parcours : *Préparation du sportif : aspects physiques, nutritionnels et mentaux*

## MEMOIRE

TITRE : Analyse et prédiction de la performance sur 1 000 mètres en eau glacée

Par : Mattéo LUTUN

Sous la direction de : Frédéric DAUSSIN

Soutenu à la Faculté des Sciences du Sport et  
de l'Éducation Physique le :  
Lundi 18 mai 2026



« Le département des Sciences du Sport et de l'Education Physique de l'UFR3S n'entend donner aucune approbation aux opinions émises dans les mémoires ; celles-ci sont propres à leurs auteurs. »

Ce mémoire a été rédigé avec l'assistance de Claude.ai pour la correction orthographique et grammaticale (5%). Toutes les informations ont été vérifiées et le contenu final reste sous mon entière responsabilité.

## Remerciement

Je tiens tout d'abord à exprimer ma sincère gratitude à l'UFR3S (Unité de Formation et de Recherche des Sciences de la Santé et du Sport) pour la qualité de la formation dispensée tout au long de mon cursus, ainsi que pour le cadre académique qui a rendu possible la réalisation de ce travail de recherche.

Mes remerciements les plus chaleureux s'adressent à mon directeur de mémoire, Monsieur Frédéric Daussin, pour ses précieux conseils, sa disponibilité, ses relectures attentives et la pertinence de ses corrections tout au long de l'élaboration de ce mémoire.

Je remercie également l'International Ice Swimming Association (IISA) pour son rôle fondamental dans l'organisation et la standardisation de la natation en eau glacée. Sans le cadre réglementaire strict établi par cette association, la conduite d'une étude rigoureuse et reproductible dans cette discipline ne serait pas envisageable.

Mes remerciements vont aussi à la Fédération Française de Natation (FFN) pour l'organisation des Championnats de France de nage en eaux glacées, qui ont constitué le cadre essentiel à la réalisation de ce travail de recherche.

Enfin, je tiens à adresser un remerciement tout particulier à l'ensemble des nageurs et nageuses ayant accepté de participer à cette étude. Leur implication, leur disponibilité et leur engagement, tant lors de l'épreuve en eau glacée que lors de l'épreuve en bassin tempéré, ont été indispensables à la réalisation de ce mémoire. Je leur en suis profondément reconnaissant.

## Sommaire

Introduction.....	1
1.Revue de littérature .....	2
1.1.Définition et contexte de la natation en eau froide et glacée .....	2
1.2. Effet de la température de l’eau sur la performance .....	3
1.3. Influence des caractéristiques anthropométriques sur la performance .....	4
1.4. Effets de l’eau froide sur la technique de nage .....	6
1.5. Effets du froid extrême (< 5 °c) sur la performance et la technique.....	7
2. Problématique, objectifs et hypothèses .....	8
3. Stage.....	10
3.1. Sujets.....	10
3.2. Matériel et techniques de mesure.....	10
3.3. Protocole .....	11
3.4. Analyses statistiques .....	12
4. Résultats.....	13
4.2. Discussion.....	17
4.2.1. Interprétation.....	17
4.2.2. Limites .....	19
4.2.3. Application sur le terrain.....	19
4.2.4. Perspectives.....	20
Conclusion .....	21

## Glossaire

ANOVA : *Analysis of Variance* (analyse de la variance)

et al. : *et alii* (et collaborateurs)

ET : Écart-type

FFN : Fédération Française de Natation

IISA : *International Ice Swimming Association*

IMC : Indice de masse corporelle

IN : Indice de nage

JASP : *Jeffreys's Amazing Statistics Program*

MCAv : *Middle Cerebral Artery velocity* (vélocité du flux sanguin dans l'artère cérébrale moyenne)

PCO<sub>2</sub> : Pression partielle en dioxyde de carbone

PETCO<sub>2</sub> : Pression partielle de CO<sub>2</sub> en fin d'expiration (*End-Tidal CO<sub>2</sub>*)

RMSE : *Root Mean Square Error* (erreur quadratique moyenne)

SL : *Stroke Length* (amplitude de nage)

SR : *Stroke Rate* (fréquence gestuelle)

STAPS : Sciences et Techniques des Activités Physiques et Sportives

UFR3S : Unité de Formation et de Recherche des Sciences de la Santé et du Sport

Vs : *versus*

$\Delta$  : Variation, différence

$\rho$  : Coefficient de corrélation de Spearman

$\pm$  : Plus ou moins (écart-type autour de la moyenne)

n, N : Taille de l'échantillon

p : Probabilité (*p-value*)

r : Coefficient de corrélation de Pearson

R : Coefficient de corrélation multiple

R<sup>2</sup> : Coefficient de détermination

M<sub>0</sub> à M<sub>8</sub> : Modèles de régression emboîtés

## Introduction

La natation en eau froide et, plus spécifiquement, la natation en eau glacée connaît un essor marqué depuis une dizaine d'années, tant dans le milieu sportif que dans le champ de la recherche scientifique. Longtemps considérée comme une pratique marginale, elle s'est progressivement structurée avec l'émergence de compétitions officielles encadrées par l'International Ice Swimming Association (IISA).

Parmi celles-ci figurent notamment l'Ice Mile et l'Ice Kilometre, épreuves réalisées sans protection isothermique dans des eaux dont la température est inférieure ou égale à 5 °c. Ces formats compétitifs imposent aux nageurs une contrainte physiologique extrême, associant un effort d'endurance prolongé à un stress thermique intense. À ce titre, la natation en eau glacée constitue un modèle d'étude particulièrement pertinent pour explorer les limites de la performance humaine.

À ce jour, la littérature scientifique s'est principalement intéressée aux effets de l'immersion en eau froide sur l'organisme (Button et al), notamment à la tolérance au froid, aux risques physiologiques associés (Diversi et al), aux bénéfices potentiels, ainsi qu'aux réponses physiologiques aiguës et chroniques (Kenny et al). Plusieurs travaux ont également porté sur l'influence du sexe, des caractéristiques anthropométriques (indice de masse corporelle, masse grasse), ou encore sur le rôle du tissu adipeux brun dans la thermorégulation (Knechtle et al). En revanche, peu d'études se sont focalisées sur la performance sportive en tant que telle, et plus particulièrement sur la comparaison des performances en fonction de la température de l'eau.

Dans le domaine de la natation dite « classique », certaines recherches ont analysé l'impact de la température de l'eau sur la performance, généralement dans des plages comprises entre 18 °c et 32 °c. Toutefois, à ma connaissance, aucune étude n'a comparé de manière directe la performance sur une distance standardisée de 1000 mètres réalisée en bassin tempéré (27 °c) et celle réalisée en eau glacée à une température inférieure à 5 °c.

Dans ce contexte marqué par un manque de données scientifiques spécifiques, le présent mémoire se propose de comparer la performance sur 1000 mètres effectuée en bassin à 27 °c à celle réalisée en eau glacée. L'ensemble des conditions expérimentales sera strictement standardisé et conforme aux règlements officiels de l'IISA.

Cette recherche poursuit un double objectif : d'une part, comprendre et quantifier la dégradation de la performance induite par l'exposition à l'eau glacée à travers différentes variables ; d'autre part, proposer une équation de prédiction permettant d'estimer la performance sur 1000 mètres en eau glacée à partir d'une performance réalisée en bassin tempéré.

## **1. Revue de littérature**

### **1.1. Définition et contexte de la natation en eau froide et glacée**

Dans la littérature scientifique, l'eau froide est définie comme une eau dont la température est inférieure à 10 °c (Knechtle et al., 2015). En dessous de ce seuil, les mécanismes de thermorégulation sont fortement sollicités et la perte de chaleur corporelle devient significative, en particulier lors d'une exposition prolongée. Des chercheurs ont modélisé les réponses thermorégulatrices humaines à une immersion dans une eau à exactement 10 °c, selon trois niveaux d'immersion. Leurs résultats montrent que le système thermorégulateur est fortement sollicité dès ce seuil :

« Lors d'une immersion totale du corps dans une eau à 10 °c, la température cérébrale chute au seuil critique de 35 °c (hypothermie) en seulement 25 minutes, avec des pertes de chaleur par convection atteignant 759 W. La tête hors de l'eau, ce délai s'allonge à 49 minutes (638 W perdus), et lorsque la tête, les bras et les mains restent hors de l'eau, à 74 minutes (465 W). » (Yermakova et al., 2015).

La natation en eau froide (cold water swimming) désigne l'ensemble des pratiques de nage dont la température de l'eau est inférieure à 10°C. La natation en eau glacée (ice swimming) constitue une sous-catégorie spécifique de la natation en eau froide et correspond à des températures extrêmes, inférieures ou égales à 5 °c. Cette définition est notamment formalisée par l'IISA, qui encadre les compétitions officielles telles que l'Ice Mile (1 mile, soit 1 609 m) et l'Ice Kilometre (1 000 m), réalisées sans combinaison isothermique, uniquement avec un maillot de bain classique, un bonnet et des lunettes (International Ice Swimming Association., 2021). Ces règles visent à préserver l'authenticité de la discipline tout en accentuant les contraintes physiologiques imposées par le froid.

## 1.2. Effet de la température de l'eau sur la performance

La spécificité de la natation en eau froide et glacée réside dans l'exposition simultanée à un effort physique d'endurance et à un stress thermique intense. L'eau possède une conductivité thermique environ 20 fois supérieure à celle de l'air, ce qui entraîne une perte de chaleur rapide et continue au niveau cutané et musculaire. Cette exposition induit des contraintes physiologiques majeures, bien documentées dans une étude menée sur 32 nageurs (15 experts, 17 novices) immergés soudainement dans une eau à 10 °c. Dès les premières secondes, les auteurs observent une cold shock response universelle, indépendante du niveau de compétence des nageurs : la fréquence respiratoire bondit à  $58 \pm 18$  cycles par minute, la pression partielle en dioxyde de carbone (PCO<sub>2</sub>) et pression partielle de CO<sub>2</sub> en fin d'expiration (PETCO<sub>2</sub>) chute à  $12 \pm 9$  mmHg traduisant une hypocapnie marquée, et la vélocité du flux sanguin cérébral (MCAv) diminue de  $20 \pm 11$  % dans les 30 premières secondes. Par ailleurs, la capacité de nage est réduite de 34 à 41 % par rapport à une eau tempérée (27 °c), quel que soit le niveau du nageur. Ces données confirment que l'immersion soudaine en eau froide génère des perturbations cardio-respiratoires et cérébrovasculaires immédiates et sévères, auxquelles s'ajoutent une vasoconstriction périphérique marquée et une altération de la coordination neuromusculaire. Ces réponses physiologiques peuvent affecter la capacité à maintenir une nage efficace, influencer la perception de l'effort et limiter la durée ou l'intensité de la performance. Par ailleurs, malgré certaines adaptations observées chez les nageurs entraînés en eau froide, notamment une meilleure tolérance subjective au froid, les réponses réflexes initiales et la baisse progressive de la température corporelle centrale demeurent des facteurs limitants majeurs (Button et al., 2014).

La question de la tolérance individuelle au froid constitue un axe de recherche complémentaire important. En particulier, les différences entre hommes et femmes ont fait l'objet d'investigations spécifiques. Dans l'étude, la *cold shock response* s'est révélée universelle et d'intensité comparable quel que soit le niveau de compétence ou le sexe des participants. Ces résultats suggèrent que ni l'expérience aquatique ni le sexe ne constituent des facteurs protecteurs face aux perturbations cardio-respiratoires immédiates induites par l'immersion froide.

Ces observations sont cohérentes avec d'autres travaux qui ont étudié les réponses thermorégulatrices de 11 femmes ( $24,4 \pm 6,3$  ans ; masse grasse :  $22,4 \pm 5,9$  %) et 14 hommes immergés jusqu'au cou dans une eau à  $18$  °c pendant 90 minutes. Le taux de refroidissement de la température rectale ( $\Delta T_{re}/\Delta t$ ) était environ deux fois plus lent chez les femmes ( $0,47$  °c/h) que chez les hommes, et le taux métabolique augmentait d'environ trois fois les valeurs de repos chez les deux sexes (Gagnon et al., 2000). Toutefois, lorsque les sujets étaient appariés selon la composition corporelle, aucune différence significative entre les sexes n'était observée pour le taux de refroidissement, le métabolisme énergétique, ni pour la contribution des lipides à la thermogénèse cette dernière représentant environ 60 % de la production totale de chaleur dans les deux groupes. Ces résultats indiquent que les différences de thermorégulation entre sexes sont principalement attribuables à des facteurs anthropométriques, notamment la composition corporelle et le rapport surface corporelle/masse corporelle, plutôt qu'à un dimorphisme physiologique intrinsèque.

Ainsi, la natation en eau froide et glacée soulève des enjeux spécifiques en termes de performance, de sécurité et de compréhension des mécanismes d'adaptation, justifiant l'intérêt croissant de la recherche scientifique dans ce domaine.

### **1.3. Influence des caractéristiques anthropométriques sur la performance**

En natation de compétition en piscine, la taille corporelle constitue un prédicteur reconnu de la performance, notamment via son influence sur l'amplitude de nage (stroke length, SL) : un gabarit plus grand permet de couvrir davantage de distance par cycle de bras, réduisant le nombre de cycles nécessaires pour parcourir une distance donnée. À titre de référence, les nageurs élites de fond maintiennent une amplitude de l'ordre de  $1,68$  à  $2,10$  m par cycle en crawl, avec des fréquences de nage de  $40$  à  $50$  cycles $\cdot$ min $^{-1}$  (Staunton et al., 2025). La composition corporelle, notamment la masse grasse, est également étudiée comme facteur potentiel de protection thermique en eau froide.

Toutefois, (Knechtle et al., 2021) remettent en question l'hypothèse selon laquelle une adiposité plus élevée favoriserait la performance, sur la base d'une large cohorte de 957 nageurs dans l'Ice Km (590 hommes, 367 femmes) et 585 nageurs dans l'Ice Mile (334 hommes, 251 femmes), ayant tous complété leur épreuve dans une eau inférieure à  $5$  °c. Chez les hommes, la performance est négativement corrélée à l'âge dans l'Ice Km ( $r = -0,343$  ;  $p < 0,001$ ) et dans l'Ice Mile ( $r = -0,237$  ;  $p < 0,001$ ), à la masse corporelle (Ice Km :  $r = -0,105$  ;  $p = 0,036$  ; Ice Mile :  $r = -0,143$  ;  $p = 0,040$ ) et à l'IMC (Ice Km

:  $r = -0,118$  ;  $p = 0,018$  ; Ice Mile :  $r = -0,175$  ;  $p = 0,012$ ). Chez les femmes, ces corrélations négatives sont encore plus marquées pour l'âge (Ice Km :  $r = -0,592$  ;  $p < 0,001$  ; Ice Mile :  $r = -0,402$  ;  $p < 0,001$ ) et l'IMC dans l'Ice Km ( $r = -0,501$  ;  $p < 0,001$ ). La taille corporelle est faiblement mais significativement corrélée positivement à la vitesse chez les femmes dans l'Ice Km ( $r = 0,151$  ;  $p = 0,013$ ), cohérent avec le rôle de l'amplitude de nage évoqué en natation classique. Par ailleurs, la température de l'eau ( $r = -0,120$  ;  $p = 0,022$ ) et la température de l'air ( $r = -0,142$  ;  $p = 0,006$ ) sont négativement corrélées à la vitesse chez les femmes dans l'Ice Km uniquement, aucune corrélation significative n'étant observée chez les hommes ( $p > 0,05$ ), suggérant une plus grande sensibilité des nageuses aux conditions environnementales. Il convient de souligner que ces analyses portent sur la vitesse moyenne et non sur son évolution au fil de l'épreuve. Chez un nageur expérimenté présentant un IMC  $> 35$  kg/m<sup>2</sup> et une masse grasse d'environ 45 %, la température corporelle centrale n'a diminué que de 1,7 °c pendant la nage et de 3,3 °c après l'épreuve (Kenny et al., 2017), illustrant un rôle protecteur de l'adiposité sur la thermorégulation sans avantage de vitesse. Ces résultats indiquent que la réussite en eau glacée dépend davantage de l'entraînement spécifique et de la tolérance individuelle au froid que des seules caractéristiques anthropométriques.

L'acclimatation progressive au froid constitue à cet égard un levier reconnu. Elle désigne l'adaptation progressive des réponses thermorégulatrices à des expositions répétées au froid, et peut prendre une forme métabolique (augmentation de la thermogénèse), isolante (vasoconstriction cutanée accrue) ou hypothermique (tolérance à un abaissement de la température centrale). Il a été montré (Young et al., 1986), chez sept hommes soumis à 90 minutes d'immersion quotidienne à 18 °c, cinq fois par semaine pendant cinq semaines, que le métabolisme lors des dix premières minutes d'exposition était significativement réduit après acclimatation ( $p < 0,02$ ), traduisant une adaptation de type isolant. Des expositions plus légères ; immersions en eau à 26 °c, trois fois par semaine pendant quatre semaines ; suffisent également à induire une réduction significative de la température cutanée et du flux sanguin cutané à l'avant-bras (Wakabayashi et al., 2011). Enfin, cinq immersions de deux minutes dans une eau à 15 °c suffisent à réduire la cold shock response de 50 %, avec un effet persistant jusqu'à un an (Tipton et al., 1998), soulignant que même un protocole minimal peut produire des adaptations durables et cliniquement pertinentes pour les nageurs en eau froide.

#### 1.4. Effets de l'eau froide sur la technique de nage

En natation de compétition en piscine, la vitesse de nage est le produit de deux paramètres biomécaniques interdépendants : la fréquence de nage (stroke rate, SR, définie comme le nombre de cycles de bras complets effectués par le nageur en une minute, exprimée en  $\text{cycles} \cdot \text{min}^{-1}$ ) et l'amplitude du geste (stroke length, SL, définie comme la distance parcourue par le nageur à chaque cycle de bras complet, exprimée en mètres). Toute modification de l'un de ces paramètres se répercute directement sur la vitesse propulsive. En nage de fond de haut niveau, les nageurs élités privilégient un équilibre SR/SL qui varie selon la distance : en sprint (50–100 m), c'est le SL qui prédomine comme déterminant de la vitesse ( $p = 0,57$  chez les hommes ;  $p = 0,50$  chez les femmes), tandis qu'en fond (800–1 500 m), c'est le SR qui devient le facteur le plus fortement corrélé à la performance (1 500 m hommes :  $p = 0,37$  ; 800 m femmes :  $p = 0,45$ ) (Staunton et al., 2025). C'est la capacité à maintenir ces deux paramètres stables sur la durée qui caractérise l'efficacité technique en nage d'endurance.

En contexte d'eau froide, ces paramètres sont directement perturbés par la fatigue thermique. Une étude (Diversi et al., 2016) a suivi neuf nageurs expérimentés (hommes et femmes) lors d'une nage d'endurance de 6 heures à  $15\text{--}15,8\text{ }^{\circ}\text{C}$  dans le cadre de leur qualification pour la traversée de la Manche. La fréquence de nage moyenne sur l'ensemble de l'épreuve était de  $57,8\text{ cycles} \cdot \text{min}^{-1}$  (étendue :  $48\text{--}73\text{ cycles} \cdot \text{min}^{-1}$ ), et une diminution significative de  $-9,7\%$  du SR a été observée entre le début et la fin des 6 heures ( $p < 0,05$ ). Ce déclin n'était pas linéaire : le taux de refroidissement de la température centrale était six fois plus rapide dans les trois dernières heures ( $-0,36\text{ }^{\circ}\text{C/h}$ ) que dans les trois premières ( $-0,06\text{ }^{\circ}\text{C/h}$ ). Une forte corrélation positive a été mise en évidence entre la variation du SR entre 3 h et 6 h et la température centrale sur l'ensemble de la nage ( $r = 0,840$  ;  $p < 0,05$ ), ainsi qu'entre la variation du SR et la température centrale sur la période 3–6 h ( $r = 0,827$  ;  $p < 0,05$ ). La réduction du SR constitue ainsi un indicateur fiable et mesurable de la fatigue thermique en cours d'épreuve. Par ailleurs, l'âge s'est révélé significativement corrélé à la variation de la température centrale ( $r = -0,901$  ;  $p < 0,05$ ) et à celle du SR ( $r = -0,915$  ;  $p < 0,05$ ), indiquant une vulnérabilité accrue des nageurs plus âgés lors d'expositions prolongées au froid.

### 1.5. Effets du froid extrême (< 5 °c) sur la performance et la technique

Bien que la littérature sur la natation en eau glacée (< 5 °c) reste limitée, des études de cas documentent des impacts sévères sur la performance technique et physiologique. Une étude montre deux nageurs masculins expérimentés complétant un Ice Mile (1 600 m) dans une eau à 3,9 °c, avec comparaison à une nage en piscine à 28,1 °c. La fréquence respiratoire et l'allure de nage ont diminué progressivement au cours de l'épreuve pour les deux nageurs. L'un d'eux a présenté une hypothermie ; définie cliniquement par une température corporelle centrale inférieure à 35 °c ; après seulement 27 minutes de nage, atteignant 33,7 °c en fin d'épreuve, avec une chute marquée de l'allure lors du dernier 400 m. À la sortie de l'eau, les deux nageurs ont présenté un phénomène d'afterdrop ; poursuite de la chute de température centrale après l'arrêt de l'effort ; de -3,6 °c et -2,4 °c respectivement, atteignant des minimums de 33,2 °c et 31,3 °c dans les 23 à 38 minutes suivant la fin de la nage, et restaient hypothermiques 60 minutes après la sortie de l'eau (Kenny et al., 2017).

Ces données illustrent que, dans une eau à moins de 5 °c, la dégradation de la performance ne se limite pas à une réduction de la vitesse moyenne mais affecte la capacité à maintenir un rythme stable sur la totalité de la distance, et que les risques physiologiques se prolongent bien au-delà de la durée de l'épreuve elle-même.

## 2. Problématique, objectifs et hypothèses

Au regard de la littérature scientifique existante et du manque de données comparatives spécifiques entre la natation en bassin tempéré et la natation en eau glacée, ce mémoire s'inscrit dans une démarche exploratoire visant à mieux comprendre les déterminants de la performance en conditions de froid extrême. La problématique centrale de ce travail est la suivante :

*Peut-on prédire la performance réalisée sur 1000 mètres en eau glacée à partir de la performance réalisée sur la même distance en bassin tempéré à 27 °c ?*

Deux objectifs structurent ce travail :

***Objectif principal : Analyser l'effet de l'eau glacée sur la performance.***

Il s'agit d'examiner, à partir de variables techniques et quantitatives, dans quelle mesure l'immersion en eau glacée modifie la performance par rapport aux conditions de bassin tempéré. Cet objectif repose sur une analyse comparative des indicateurs de performance entre les deux conditions expérimentales.

***Objectif secondaire : Élaborer une équation de prédiction.***

Sur la base des relations identifiées au cours du premier objectif, ce travail cherche à construire un modèle de prédiction permettant d'estimer la performance en eau glacée à partir de la performance en bassin tempéré, en intégrant les variables explicatives les plus pertinentes.

À partir de cette problématique générale, plusieurs hypothèses de recherche ont été formulées, en lien avec les variables de performance, les paramètres techniques et les caractéristiques individuelles des nageurs.

### **Hypothèse Principale : Dégradation de la performance en eau glacée**

La performance (Temps) sur 1 000 mètres est significativement moins bonne en eau glacée (< 5 °c) qu'en bassin tempéré (27 °c). Cette dégradation s'expliquerait par les contraintes physiologiques induites par le stress thermique, notamment la vasoconstriction périphérique, la réduction de la température musculaire et l'altération de la coordination neuromusculaire.

### **Hypothèse secondaire : Impact de l'eau glacée sur la technique de nage**

La deuxième hypothèse avance que la nage en eau glacée entraîne une altération significative de la technique de nage par rapport à une nage réalisée en bassin tempéré. Cette dégradation technique se traduirait notamment par une diminution de la fréquence gestuelle et de l'amplitude de nage par 100 mètres et donc de l'indice de nage (IN). Ces perturbations biomécaniques contribueraient directement à la baisse de performance observée en conditions froides.

### **Hypothèse : Influence de l'indice de masse corporelle sur la dégradation de la performance**

Les nageurs présentant un indice de masse corporelle (IMC) plus élevé subiraient une dégradation de performance moindre en eau glacée. Le tissu adipeux, en jouant un rôle d'isolation thermique, limiterait la perte de chaleur corporelle et retarderait l'apparition des effets délétères du froid au cours d'un effort prolongé.

### **Hypothèse : Modélisation prédictive de la performance en eau glacée**

Enfin, une hypothèse propose qu'un modèle multifactoriel intégrant la performance réalisée en bassin tempéré, l'IMC, l'expérience en nage en eau froide ou glacée, ainsi que les paramètres techniques de nage (fréquence gestuelle, amplitude de nage, vitesse par 100 mètres), permette de prédire de manière fiable la performance sur 1000 mètres en eau glacée. Cette hypothèse s'inscrit dans une démarche appliquée visant à proposer un outil de prédiction utilisable dans un contexte d'entraînement, de préparation à la compétition ou de gestion du risque en natation en eau glacée.

### 3. Stage

#### 3.1. Sujets

L'échantillon se compose de 11 nageurs volontaires (6 femmes et 5 hommes) ayant participé aux Championnats de France de nage en eaux glacées, organisés le 9 janvier 2026 à Saint-Louis (Alsace), puis à une épreuve en bassin tempéré réalisée au cours du mois de février 2026. Un critère d'inclusion minimal a été appliqué : chaque participant devait avoir réalisé au préalable au moins un 500 mètres en eaux glacées, afin de garantir un niveau de sécurité et d'expérience suffisant. Les caractéristiques descriptives de l'échantillon sont présentées dans le tableau 1.

Tableau 1 : Caractéristiques descriptives des participants ( $n = 11$ )

	Taille		Masse		Age		IMC		Expérience	
	F	H	F	H	F	H	F	H	F	H
Moyenne	1.668	1.777	69.833	82.000	44.667	31.000	25.058	25.944	3.333	4.200
Écart type	0.086	0.084	8.819	10.794	13.307	9.274	2.439	2.792	0.516	0.837
Shapiro-Wilk	0.902	0.783	0.827	0.976	0.945	0.905	0.884	0.918	0.640	0.881
Valeur p de Shapiro-Wilk	0.387	0.058	0.102	0.911	0.698	0.436	0.289	0.517	0.001	0.314

#### 3.2. Matériel et techniques de mesure

Les variables relevées lors des deux épreuves sont les suivantes : le temps total sur 1 000 mètres, les temps de passage par tranche de 100 mètres, et la fréquence gestuelle sur chaque segment de 100 mètres. En eaux glacées, le temps total a été mesuré par chronométrage officiel avec plaque FFN, et la fréquence gestuelle relevée par analyse vidéo. En bassin tempéré, le chronométrage a été réalisé manuellement par le chaperon, et la fréquence gestuelle obtenue par comptage direct du nombre de cycles de bras. À partir de ces données brutes, plusieurs variables dérivées ont été calculées : la vitesse de nage, l'amplitude de nage, l'IN ( $SL \times Vitesse$ ), ainsi que différents indices de dégradation de la performance. Les données ont été saisies sous Microsoft Excel, puis exportées vers le logiciel JASP pour les analyses statistiques. Les données anthropométriques ont été autodéclarés.

### 3.3. Protocole

L'étude repose sur un plan de mesures répétées intra-sujets, chaque nageur ayant réalisé deux épreuves de 1 000 mètres en nage libre à intensité maximale : l'une en eaux glacées (4,3 °c), l'autre en bassin tempéré (27 °c). La température de l'eau constitue la seule variable indépendante manipulée ; toutes les autres conditions expérimentales ont été maintenues constantes.

Les deux épreuves ont été réalisées conformément au règlement officiel de l'IISA : départ dans l'eau avec au minimum une main et un pied en contact avec le mur, plongeon interdit, virages en culbute interdits, coulées limitées à cinq mètres après chaque virage, et contact obligatoire avec le mur à chaque demi-tour. La distance a été couverte dans un bassin de 50 mètres, sans équipement thermique.

La première épreuve s'est déroulée lors des Championnats de France du 9 janvier 2026, à une température d'eau de 4,3 °c. La seconde épreuve a été réalisée individuellement par chaque nageur au cours du mois de février 2026, dans un bassin à 27 °c situé à proximité de son lieu d'entraînement habituel. Chaque nageur était accompagné d'un chaperon chargé de relever le temps total, les temps de passage par 100 mètres et la fréquence gestuelle. Lorsque cela était possible, une vidéo complète de la nage a également été demandée afin de vérifier la conformité au protocole et la fiabilité des relevés.

### 3.4. Analyses statistiques

Les analyses ont été conduites à l'aide du logiciel JASP. Avant toute comparaison, la normalité des distributions a été vérifiée par le test de Shapiro-Wilk. La normalité était satisfaite, des tests t de Student pour échantillons appariés ont été utilisés.

Les comparaisons entre les deux conditions (27 °c vs 4,3°c) ont porté sur les variables globales (temps total, IN moyen, amplitude moyenne, fréquence gestuelle moyenne, vitesse moyenne) ainsi que sur les temps de passage et les paramètres techniques segment par segment (10 segments de 100 mètres).

L'évolution interne de la fréquence gestuelle au sein de chaque épreuve a été analysée par ANOVA à mesures répétées (un facteur : segment). Des comparaisons post-hoc avec correction de Holm ont été réalisées pour identifier les segments significativement différents.

Enfin, une régression linéaire simple puis multiple a été conduite afin de modéliser la performance en eaux glacées à partir de la performance en bassin et de variables complémentaires (âge, taille, masse, IMC, IN, expérience). Plusieurs modèles emboîtés (M0 à M8) ont été comparés sur la base du R<sup>2</sup> ajusté et de l'erreur quadratique moyenne (RMSE). Une procédure de bootstrap (1 000 répliques) a été appliquée afin de vérifier la stabilité des coefficients compte tenu de la taille réduite de l'échantillon.

## 4. Résultats

Tableau 2 : Statistiques descriptives et normalité des variables de performance et techniques dans les deux conditions expérimentales (n = 11)

Statistiques descriptives

	Moyenne	Shapiro-Wilk	Valeur p de Shapiro-Wilk
% dégradation du temps	6.717 ± 2.497	0.955	0.708
Vmoy1000_4	1.047 ± 0.131	0.959	0.754
Vmoy1000_27	1.108 ± 0.149	0.946	0.597
F moy 4.3°C	30.516 ± 2.943	0.834	0.026
F moy 27°C	30.400 ± 3.163	0.826	0.021

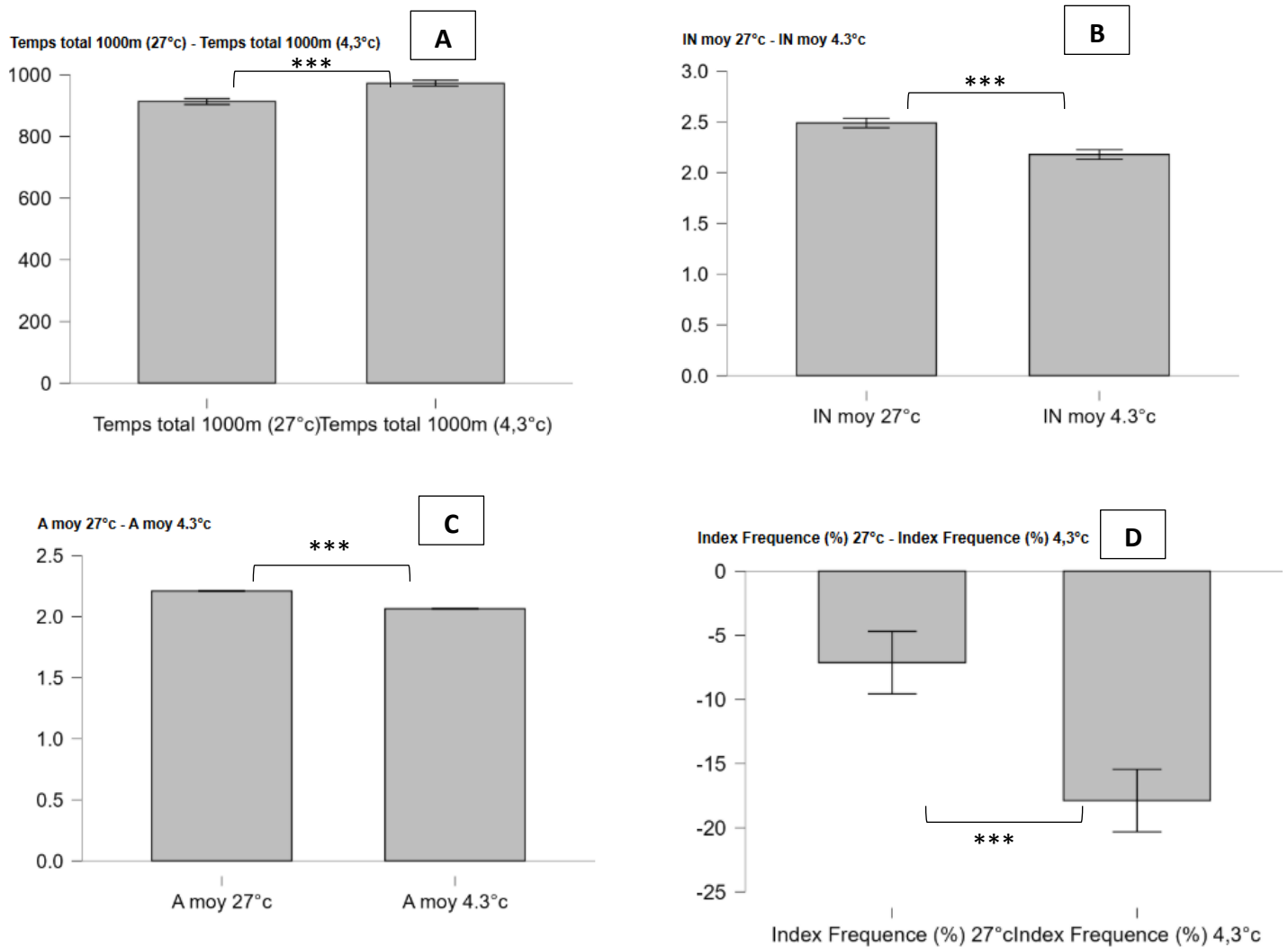


Figure 1 : Comparaison des moyennes (± ET) du A : temps total, B : l'indice de nage, C : l'amplitude et D : l'index de fréquence entre les conditions 27 °c et 4,3 °c (n = 11)

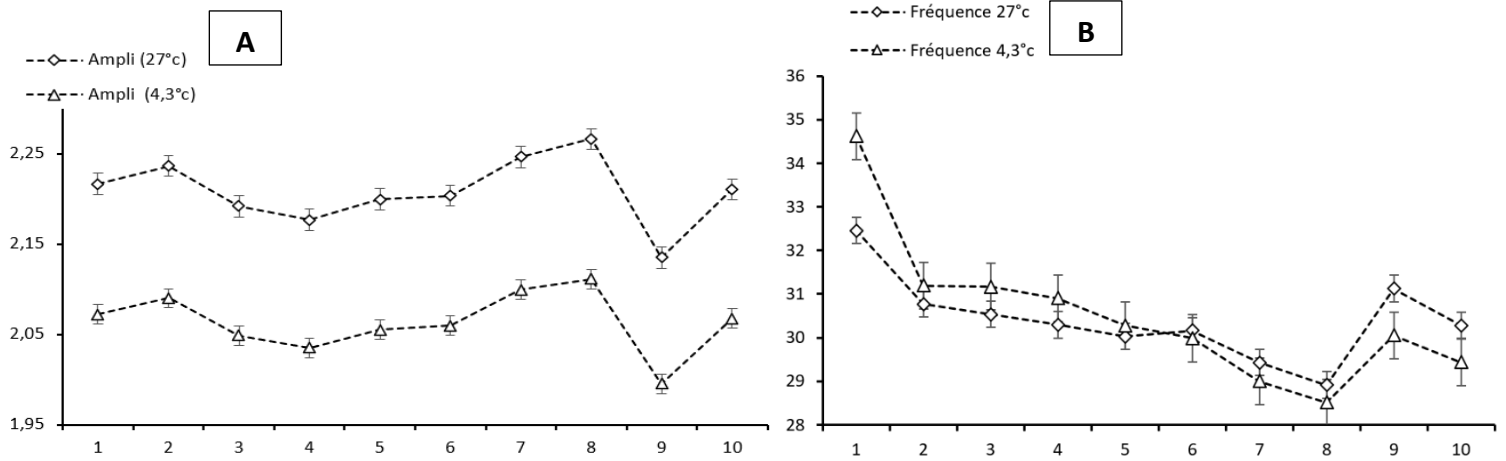


Figure 2 : Évolution de A : l'amplitude (m/cycle) et de la B : fréquence de nage (cycles/min) à 27 °c et 4,3 °c au cours du 1000 m (par fractions de 100 m). n=11

Le temps total au 1000 m est significativement ( $p < 0.001$ ) plus élevé à 4,3 °c qu'à 27 °c, avec une augmentation moyenne de 60 secondes (figure 1 : A)

L'indice de nage diminue significativement entre les deux conditions, passant en moyenne de 2,489  $m^2/cycle/min$  à 27 °c à 2,178  $m^2/cycle/min$  à 4,3 °c (figure 1 : B et C). La diminution de l'amplitude, qui passe de 2,209 m/cycle à 2,065 m/cycle est aussi statistiquement significative ( $p < 0.001$ ).

La fréquence moyenne globale sur le 1000 m n'est pas significativement différente entre les deux conditions ( $p > 0,5$ ). L'index de fréquence est significatif ( $P < 0.001$ ).

Le modèle M2 prédit à 99% la performance avec un RMSE de 13,4s et M8 prédit la performance à 98% avec un RMSE de 19,4s (tableau 4).

## Régression Linéaire

Tableau 3 : Coefficients de régression bootstrap (1 000 réplifications) pour les modèles  $M_0$  à  $M_8$  prédisant le temps total sur 1 000 mètres en eaux glacées (4,3 °c) ( $n = 11$ )

Modele		Non standardise	Biais	Erreur standard	p*		
$M_0$	(Intercept)	-343.123	-20682.449	327477.262	0.272		
	Temps total 1000m (27°C)	0.764	3.468	51.981	0.661		
	Taille	64.374	-2926.951	7958.462	0.001		
	Age	0.752	11.729	72.094	0.032		
	IN moy 27°C	-363.089	-2899.204	35164.094	0.914		
	A moy 27°C	699.014	9031.092	108886.463	0.881		
	F moy 27°C	41.261	474.458	5225.929	0.668		
	Masse	-1.291	25.021	147.239	0.001		
	IMC	-1.468	-54.777	1053.552	0.032		
	Expérience	-26.605	15.204	23.351	NaN		
$M_1$	(Intercept)	416.503	-10320.763	239970.031	0.045		
	Temps total 1000m (27°C)	0.802	0.121	6.021	0.562		
	Taille	83.258	6075.249	143634.239	0.008		
	Age	-0.377	3.564	71.332	0.055		
	IN moy 27°C	-112.218	70.554	2909.124	0.404		
	A moy 27°C	86.220	-120.564	4112.063	0.481		
	Masse	0.671	-95.255	1825.339	0.039		
	IMC	-5.805	617.705	7359.476	0.201		
	Expérience	-34.698	6.739	38.448	0.230		
	$M_2$	(Intercept)	62.985	6811.894	44973.305	0.169	
Temps total 1000m (27°C)		0.894	-0.362	5.336	0.023		
Taille		159.370	-3984.664	28097.338	0.096		
Age		-1.173	7.888	46.093	0.074		
IN moy 27°C		-50.587	52.305	1081.993	0.231		
Masse		-0.796	49.006	349.554	0.134		
IMC		31.843	-161.423	1187.402	0.248		
Expérience		-25.273	12.206	71.947	0.120		
$M_3$		(Intercept)	199.363	-49.461	7228.786	0.437	
		Temps total 1000m (27°C)	0.884	0.148	5.378	0.091	
	Taille	60.222	-20.363	2665.579	0.966		
	Age	-1.517	-1.955	44.280	0.219		
	IN moy 27°C	-48.086	-15.821	642.575	0.732		
	IMC	1.621	2.940	85.822	0.718		
	Expérience	-12.470	-0.920	66.967	0.783		
	$M_4$	(Intercept)	232.299	-146.480	4217.816	0.247	
		Temps total 1000m (27°C)	0.867	0.188	1.273	0.049	
		Taille	65.356	-30.811	1509.847	0.569	
Age		-1.256	-0.587	17.351	0.106		
IN moy 27°C		-41.497	18.876	218.250	0.396		
Expérience		-7.606	3.944	149.974	0.734		
$M_5$		(Intercept)	144.726	-104.517	2310.097	0.316	
		Temps total 1000m (27°C)	0.872	0.077	1.145	0.035	
		Taille	79.986	14.469	232.762	0.506	
		Age	-1.064	0.054	4.164	0.196	
	IN moy 27°C	-36.886	3.905	448.767	0.176		
	$M_6$	(Intercept)	305.961	-39.694	288.890	0.129	
		Temps total 1000m (27°C)	0.879	0.008	0.231	0.011	
		Age	-1.183	0.320	1.140	0.068	
		IN moy 27°C	-37.814	8.010	43.991	0.194	
		$M_7$	(Intercept)	97.411	-7.248	96.037	0.300
Temps total 1000m (27°C)			0.999	0.004	0.135	< .001	
Age			-0.765	0.115	0.808	0.353	
$M_8$			(Intercept)	109.702	-12.111	59.267	0.127
			Temps total 1000m (27°C)	0.944	0.014	0.067	< .001

Note. Bootstrapping based on 1000 replicates.

Note. L'estimation du coefficient vient de la médiane de la distribution de bootstrap.

\* Bias corrected accelerated.

## Équations de prédiction

Tableau 4 : Sommaire des modèles de régression linéaire multiple ( $M_0$  à  $M_8$ ) prédisant le temps total sur 1 000 mètres en eaux glacées ( $4,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) —  $R$ ,  $R^2$ ,  $R^2$  ajusté et RMSE ( $n = 11$ )

Modèle	R	$R^2$	$R^2$ ajusté	RMSE
$M_0$	0.999	0.998	0.980	18.926
$M_1$	0.999	0.998	0.990	13.388
$M_2$	0.998	0.997	0.990	13.394
$M_3$	0.996	0.992	0.981	18.385
$M_4$	0.996	0.992	0.983	17.135
$M_5$	0.996	0.991	0.985	16.155
$M_6$	0.994	0.989	0.984	16.957
$M_7$	0.992	0.984	0.980	18.883
$M_8$	0.990	0.981	0.979	19.369

Tableau 5: Corrélations de Pearson entre le pourcentage de dégradation du temps et l'IMC.

Corrélations de Pearson

Variable	% dégradation du temps	
1. % dégradation du temps	R de Pearson	—
	P-value	—
2. IMC	R de Pearson	-0.244
	P-value	0.469

Deux modèles de régression ont été retenus. Le modèle  $M_8$ , fondé sur un unique prédicteur, offre une équation de prédiction simple et directement applicable :

$$\hat{T}_{4,3^{\circ}\text{C}} = 0,944 \times T_{27^{\circ}\text{C}} + 109,702$$

Avec une erreur quadratique moyenne de RMSE = 19,37 secondes.

Le modèle  $M_2$ , multifactoriel, intègre sept variables explicatives et améliore la précision de la prédiction (RMSE = 13,39 secondes) :

$$\hat{T}_{4,3^{\circ}\text{C}} = 0,894 \times T_{27^{\circ}\text{C}} - 50,587 \times IN_{27^{\circ}\text{C}} - 1,173 \times \hat{\text{Age}} + 159,370 \times \text{Taille} - 0,796 \times \text{Masse} + 31,843 \times \text{IMC} - 25,273 \times \text{Expérience} + 62,985$$

## 4.2. Discussion

### 4.2.1. Interprétation

L'hypothèse principale est validée. Le temps total au 1000 m est significativement plus élevé à 4,3 °C qu'à 27 °C, avec une augmentation moyenne de 60 secondes. L'analyse statistique (annexe 2) précise que l'écart se creuse à partir du 3<sup>ème</sup> 100 m et s'accroît sur les 400 derniers mètres, ce qui concorde avec la littérature, notamment Kenny et al. (2017).

L'hypothèse secondaire est partiellement validée car ses causes ne sont pas totalement avérées. L'indice de nage diminue significativement entre les deux conditions, passant en moyenne de 2,489 m<sup>2</sup>/cycle/min à 27 °C à 2,178 m<sup>2</sup>/cycle/min à 4,3 °C (figure 1). Cette dégradation s'explique principalement par la diminution de l'amplitude, qui passe de 2,209 m/cycle à 2,065 m/cycle et est significativement affectée dès le premier 100 m jusqu'au dernier (annexe 2 et figure 2).

Concernant la fréquence de nage, la moyenne globale sur le 1000 m n'est pas significativement différente entre les deux conditions, ce qui suggère qu'elle ne serait pas responsable de la diminution de l'indice de nage. Toutefois, l'analyse de la figure 2 révèle un comportement distinct : en eau à 4,3 °C, les nageurs démarrent avec une fréquence significativement plus élevée sur le premier 100 m (annexe 2), puis celle-ci chute brutalement pour revenir aux valeurs observées à 27 °C, avant de passer en dessous à partir du 600 m, sans que cela soit statistiquement significatif.

Afin d'approfondir cette question, une analyse par ANOVA à mesures répétées avec tests post hoc a été conduite sur l'évolution interne de la fréquence au fil des 100 m. Les résultats (figure 2 et annexe 4) montrent qu'à 27 °C la fréquence reste stable entre les différents 100 m, alors qu'à 4,3 °C une chute progressive et significative est observée. Un index de fréquence a alors été calculé, mesurant la dégradation en pourcentage entre le premier et le dernier 100 m (figure 1). Cet index révèle une différence significative entre les deux conditions (annexe 3) : la fréquence chute de -17 % entre le premier et le dernier 100 m à 4,3 °C, contre -7 % à 27 °C (figure 1).

Ainsi, bien qu'il n'existe pas de différence significative de la fréquence moyenne sur l'ensemble du 1000m, en eau glacée celle-ci n'est pas utilisée de la même manière : elle est plus élevée en début d'épreuve et décline fortement au fil de la nage, tandis qu'en eau tempérée elle tend à rester stable tout au long de l'effort. Ce résultat constitue un apport original par rapport à la littérature existante, qui

documente la diminution de la fréquence sur des épreuves longues (Diversi et al., 2016 ; Kenny et al., 2017) mais ne met pas en évidence cette dynamique interne sur une distance de 1000 m en eau glacée.

L'hypothèse selon laquelle il existerait une corrélation entre l'IMC et le pourcentage de dégradation de la performance n'est pas validée (tableau 5). En effet, le coefficient de corrélation de Pearson est de  $-0,244$  ( $p = 0,469$ ), indiquant l'absence de relation significative entre ces deux variables. Ce résultat est cohérent avec les travaux de Knechtle et al. (2021) qui, sur une large cohorte de nageurs en eau glacée, montrent que l'IMC est négativement corrélé à la performance, suggérant qu'une adiposité plus élevée ne constitue pas un avantage de vitesse. Toutefois, il convient de nuancer ce résultat au regard de la distance étudiée. Sur 1000 m, l'exposition au froid reste relativement courte et la thermorégulation n'est peut-être pas encore le facteur discriminant. Sur des distances plus longues, comme un Ice Mile ou au-delà, un IMC plus élevé pourrait constituer un avantage relatif : un nageur à faible adiposité, bien que plus rapide initialement, serait potentiellement contraint à l'abandon en raison d'une hypothermie plus précoce, tandis qu'un nageur avec une adiposité plus importante bénéficierait d'une protection thermique prolongée, comme le suggère le cas documenté par Knechtle et al. (2015) chez un nageur à forte adiposité dont la température centrale n'a chuté que de  $1,7\text{ °C}$  pendant un Ice mile. Ainsi, l'absence de corrélation observée ici ne permet pas d'écarter définitivement le rôle de l'IMC, et cette question mériterait d'être explorée sur des épreuves de plus longue durée.

L'hypothèse de modélisation prédictive est partiellement validée. Deux modèles de régression ont été retenus. Le modèle  $M_8$ , fondé uniquement sur le temps réalisé en bassin tempéré, offre une équation simple et directement applicable en contexte pratique, avec un RMSE de 19,369 secondes. Le modèle  $M_2$ , multifactoriel, intègre sept variables explicatives ; le temps en bassin, l'IN, l'âge, la taille, la masse, l'IMC et l'expérience en eau froide ; et améliore sensiblement la précision de la prédiction, avec un RMSE de 13,394 secondes.

Le fait que la performance en bassin tempéré soit le prédicteur principal confirme que le niveau de nage général constitue le socle de la performance en eau glacée, ce qui est cohérent avec l'ensemble de la littérature : malgré les contraintes thermiques sévères documentées par Button et al. (2014) et Kenny et al. (2017), les nageurs les plus rapides en eau tempérée restent les plus rapides en eau glacée. L'ajout de variables anthropométriques et techniques dans  $M_2$  améliore la précision, ce qui suggère que ces facteurs jouent un rôle complémentaire, sans pour autant supplanter la performance de base.

Toutefois, ces modèles doivent être interprétés avec prudence compte tenu de la taille réduite de l'échantillon ( $n = 11$ ). La procédure de bootstrap appliquée vise à limiter ce biais, mais la généralisation de ces équations à une population plus large (une plus grande étendue des IMC et de l'expérience) nécessiterait une validation sur un échantillon plus important. Ces modèles constituent néanmoins une première base concrète pour proposer un outil de prédiction utilisable en contexte d'entraînement ou de préparation à la compétition en eau glacée.

#### **4.2.2. Limites**

La principale limite de cette étude est la taille réduite de l'échantillon ( $n = 11$ ), qui contraint la puissance statistique des analyses et limite la généralisation des résultats. Il convient de préciser que l'échantillon initial comptait 31 nageurs ayant participé aux Championnats de France, mais que 20 d'entre eux n'ont pas transmis leurs données de l'épreuve en bassin tempéré, réduisant ainsi l'échantillon exploitable à 11 participants. Cette contrainte est particulièrement sensible pour la régression linéaire multiple, où le nombre de prédicteurs testés est élevé au regard du nombre de sujets. La procédure de bootstrap appliquée atténue partiellement ce biais, mais ne le supprime pas.

Par ailleurs, les deux épreuves n'ont pas été réalisées dans des conditions strictement identiques. L'épreuve en eau glacée s'est déroulée en compétition officielle, ce qui implique une dimension psychologique et motivationnelle spécifique, tandis que l'épreuve en bassin tempéré a été réalisée individuellement, encadrée par un chaperon. Cette différence de contexte peut avoir influencé le niveau d'engagement des nageurs et introduit un biais difficile à contrôler.

Enfin, le fait que les deux épreuves n'aient pas été réalisées le même jour, avec un intervalle de plusieurs semaines, ne permet pas d'exclure une évolution du niveau de forme des nageurs entre les deux mesures.

#### **4.2.3. Application sur le terrain**

Malgré ces limites, cette étude apporte des éléments concrets et directement utilisables pour les entraîneurs et les nageurs évoluant en eau froide ou glacée. Le modèle  $M_8$  constitue un outil simple de prédiction : en connaissant uniquement le temps réalisé par un nageur sur 1000 m en bassin tempéré, il est possible d'estimer son temps en eau glacée avec une marge d'erreur d'environ 19 secondes.

Les résultats sur la dégradation de l'amplitude dès le premier 100 m invitent également à repenser la stratégie d'allure en eau glacée. Un départ trop rapide, combiné à une fréquence gestuelle élevée non soutenable, semble accélérer la dégradation des paramètres techniques sur la seconde moitié de l'épreuve. Un travail spécifique sur la gestion du départ et sur le maintien de l'amplitude en conditions froides pourrait donc constituer un axe d'entraînement pertinent.

Enfin, la mise en évidence d'une chute interne de la fréquence de  $-17\%$  entre le premier et le dernier 100 m en eau glacée, contre  $-7\%$  en bassin tempéré, peut servir d'indicateur de fatigue thermique en cours d'épreuve, dans la lignée de ce que propose Diversi et al. (2016) avec la fréquence gestuelle comme marqueur du refroidissement central lors d'une nage de 6 heures à  $15^{\circ}\text{C}$  chez 9 nageurs en préparation pour l'English Channel.

#### **4.2.4. Perspectives**

Plusieurs pistes de recherche se dégagent de ce travail. En premier lieu, une réplication de l'étude sur un échantillon plus large permettrait de consolider les modèles de régression et d'en améliorer la validité externe. L'inclusion de nageurs de niveaux plus variés, notamment des débutants en eau froide, enrichirait également la compréhension des facteurs qui déterminent la tolérance individuelle au froid.

Il serait également pertinent d'étudier l'effet de la distance sur le rôle de l'IMC. Comme discuté précédemment, sur des épreuves plus longues telles que l'Ice Mile, l'extrême Ice-ile ou plus, l'adiposité pourrait jouer un rôle protecteur plus marqué, susceptible de se traduire par un avantage de performance relatif pour les nageurs à IMC plus élevé, notamment en réduisant le risque d'abandon par hypothermie.

L'intégration de mesures physiologiques directes, comme la température centrale par capsule thermique ingérée ou la température cutanée par capteurs, permettrait de mettre en relation les paramètres techniques observés avec l'évolution thermique réelle des nageurs, et de préciser à partir de quel seuil de refroidissement la dégradation technique s'accélère.

De manière plus générale, la natation en eau glacée reste un domaine très peu exploré sur le plan de la performance et de la technique, et ce mémoire s'inscrit parmi les rares travaux à s'intéresser spécifiquement à cette question, soulignant ainsi la nécessité de poursuivre les efforts de recherche dans ce domaine encore largement méconnu.

## Conclusion

Ce mémoire avait pour ambition de mieux comprendre les effets de l'eau glacée sur la performance de nage, dans un domaine scientifique encore largement inexploré. À travers la comparaison de 1000 mètres réalisés en bassin tempéré à 27 °c et en eau glacée à 4,3 °c, plusieurs résultats majeurs ont pu être établis.

En premier lieu, la dégradation de la performance en eau glacée est significative et s'établit en moyenne à 60 secondes sur 1000 m, avec une accentuation progressive sur la seconde moitié de l'épreuve. Cette dégradation est principalement portée par une chute de l'amplitude de nage, immédiate et persistante dès le premier 100 m, confirmant que l'eau glacée affecte les paramètres techniques bien avant que la fatigue musculaire classique ne s'installe. La fréquence de nage, quant à elle, présente un comportement plus complexe : stable en moyenne sur l'ensemble du 1000 m, elle révèle en réalité une dynamique interne radicalement différente en eau glacée, avec un départ élevé suivi d'une chute progressive de -17 %, contre -7 % en eau tempérée. Ce résultat constitue l'un des apports originaux de ce travail.

Par ailleurs, l'IMC ne s'est pas révélé corrélé à la dégradation relative de la performance sur cette distance, bien que cette question reste ouverte pour des épreuves plus longues. Enfin, les modèles de régression développés offrent une première base concrète pour prédire la performance en eau glacée, avec une précision satisfaisante pour un usage pratique en contexte d'entraînement ou de préparation à la compétition.

Au-delà des résultats eux-mêmes, ce mémoire illustre la richesse scientifique d'une discipline encore trop peu étudiée. La natation en eau glacée, par les contraintes physiologiques et techniques extrêmes qu'elle impose, constitue un modèle d'étude particulièrement pertinent pour explorer les limites de la performance humaine. Il est à espérer que ce travail contribue, modestement, à ouvrir la voie à de futures recherches dans ce domaine.

## Références bibliographiques

- About Us* | IISA. (2021, septembre 16). <https://internationaliceswimming.com/about-us-2/>
- Button, C., Croft, J. L., Cotter, J. D., Graham, M. J., & Lucas, S. J. E. (2015). Integrative physiological and behavioural responses to sudden cold-water immersion are similar in skilled and less-skilled swimmers. *Physiology & Behavior*, 138, 254-259. <https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2014.10.024>
- Diversi, T., Franks-Kardum, V., & Climstein, M. (2016). The effect of cold water endurance swimming on core temperature in aspiring English Channel swimmers. *Extreme Physiology & Medicine*, 5(1), 3. <https://doi.org/10.1186/s13728-016-0044-2>
- Kenny, J., Cullen, S., & Warrington, G. D. (2017). The « Ice-Mile » : Case Study of 2 Swimmers' Selected Physiological Responses and Performance. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 12(5), 711-714. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2016-0323>
- Knechtle, B., Barkai, R., Hill, L., Nikolaidis, P. T., Rosemann, T., & Sousa, C. V. (2021). Influence of Anthropometric Characteristics on Ice Swimming Performance—The IISA Ice Mile and Ice Km. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(13), 6766. <https://doi.org/10.3390/ijerph18136766>
- Knechtle, B., Rosemann, T., & Rüst, C. A. (2015). Ice swimming – ‘Ice Mile’ and ‘1 km Ice event’. *BMC Sports Science, Medicine and Rehabilitation*, 7, 20. <https://doi.org/10.1186/s13102-015-0014-9>
- Staunton, C. A., Ruiz-Navarro, J. J., & Born, D.-P. (2025). Stroke rate–stroke length dynamics in elite freestyle swimming : Application of kernel density estimation. *Frontiers in Sports and Active Living*, 7. <https://doi.org/10.3389/fspor.2025.1656633>
- Thermal Conductivity—An overview* | *ScienceDirect Topics*. (s. d.). Consulté 13 janvier 2026, à l'adresse <https://www.sciencedirect.com/topics/chemical-engineering/thermal-conductivity>
- Tikuisis, P., Jacobs, I., Moroz, D., Vallerand, A. L., & Martineau, L. (2000). Comparison of thermoregulatory responses between men and women immersed in cold water. *Journal of Applied Physiology*, 89(4), 1403-1411. <https://doi.org/10.1152/jappl.2000.89.4.1403>

- Tipton, M. J., Eglin, C. M., & Golden, F. S. (1998). Habituation of the initial responses to cold water immersion in humans : A central or peripheral mechanism? *The Journal of Physiology*, 512 ( Pt 2)(Pt 2), 621-628. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7793.1998.621be.x>
- Wakabayashi, H., Wijayanto, T., Kuroki, H., Lee, J.-Y., & Tochihara, Y. (2012). The effect of repeated mild cold water immersions on the adaptation of the vasomotor responses. *International Journal of Biometeorology*, 56(4), 631-637. <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0462-1>
- Yermakova, I., Nikolaienko, A., Solopchuk, Y., & Regan, M. (2015). Modelling of human cooling in cold water: Effect of immersion level. *Extreme Physiology & Medicine*, 4(Suppl 1), A132. <https://doi.org/10.1186/2046-7648-4-S1-A132>
- Young, A. J., Muza, S. R., Sawka, M. N., Gonzalez, R. R., & Pandolf, K. B. (1986). Human thermoregulatory responses to cold air are altered by repeated cold water immersion. *Journal of Applied Physiology*, 60(5), 1542-1548. <https://doi.org/10.1152/jappl.1986.60.5.1542>



## Annexes 2 (Test Shapiro et Student)

### Vérifications des présupposés

#### Test de Normalité (Shapiro-Wilk)

	W	p
Temps total 1000m (27°C)	0.948	0.614
Inmoy1000_27	0.972	0.903
Fmoy1000_27	0.955	0.709
Amoy1000_27	0.842	0.034
Vmoy1000_27	0.948	0.615
T100 2	0.915	0.276
T200 2	0.926	0.376
T300 2	0.961	0.788
T400 2	0.926	0.374
T500 2	0.885	0.121
T600 2	0.867	0.072
T700 2	0.953	0.687
T800 2	0.829	0.023
T900 2	0.792	0.007
T1000 2	0.961	0.790
IN (27)	0.947	0.603
IN (27) 2	0.897	0.171
IN (27) 3	0.954	0.691
IN (27) 4	0.967	0.851
IN (27) 5	0.946	0.598
IN (27) 6	0.971	0.901
IN (27) 7	0.952	0.669
IN (27) 8	0.907	0.224
IN (27) 9	0.929	0.403
IN (27) 10	0.881	0.107
Ampli (27)	0.878	0.097
Ampli (27) 2	0.803	0.010
Ampli (27) 3	0.955	0.707
Ampli (27) 4	0.772	0.004
Ampli (27) 5	0.878	0.097
Ampli (27) 6	0.887	0.126
Ampli (27) 7	0.857	0.052
Ampli (27) 8	0.705	< .001
Ampli (27) 9	0.965	0.831
Ampli (27) 10	0.910	0.246
frequence (27)	0.915	0.282
frequence (27) 2	0.850	0.043
frequence (27) 3	0.909	0.237
frequence (27) 4	0.955	0.714
frequence (27) 5	0.923	0.346
frequence (27) 6	0.868	0.073
frequence (27) 7	0.957	0.737
frequence (27) 8	0.883	0.113
frequence (27) 9	0.920	0.316
frequence (27) 10	0.875	0.089

Note. Des résultats significatifs suggèrent une déviation de la normalité.

### Test T pour des échantillons appariés

#### Test t à deux échantillons appariés

Measure 1	Measure 2	t	ddl	p
Temps total 1000m (27°C)	Temps total 1000m (4,3°C)	-9.791	10	< .001
Inmoy1000_27	Inmoy1000_4	10.390	10	< .001
Fmoy1000_27	Fmoy1000_4	-0.605	10	0.559
Amoy1000_27	Amoy1000_4	31.800	10	< .001
Vmoy1000_27	Vmoy1000_4	6.852	10	< .001
T100 2	T100	0.033	10	0.974
T200 2	T200	-2.834	10	0.018
T300 2	T300	-5.766	10	< .001
T400 2	T400	-3.635	10	0.005
T500 2	T500	-4.558	10	0.001
T600 2	T600	-7.290	10	< .001
T700 2	T700	-11.774	10	< .001
T800 2	T800	-9.288	10	< .001
T900 2	T900	-6.819	10	< .001
T1000 2	T1000	-7.006	10	< .001
IN (27)	IN(4)	6.565	10	< .001
IN (27) 2	IN(4) 2	6.682	10	< .001
IN (27) 3	IN(4) 3	10.999	10	< .001
IN (27) 4	IN(4) 4	7.495	10	< .001
IN (27) 5	IN(4) 5	8.374	10	< .001
IN (27) 6	IN(4) 6	8.980	10	< .001
IN (27) 7	IN(4) 7	9.991	10	< .001
IN (27) 8	IN(4) 8	9.099	10	< .001
IN (27) 9	IN(4) 9	8.768	10	< .001
IN (27) 10	IN(4) 10	7.574	10	< .001
Ampli (27)	Ampli (4)	42.889	10	< .001
Ampli (27) 2	Ampli (4) 2	26.118	10	< .001
Ampli (27) 3	Ampli (4) 3	33.321	10	< .001
Ampli (27) 4	Ampli (4) 4	42.387	10	< .001
Ampli (27) 5	Ampli (4) 5	42.889	10	< .001
Ampli (27) 6	Ampli (4) 6	37.036	10	< .001
Ampli (27) 7	Ampli (4) 7	30.487	10	< .001
Ampli (27) 8	Ampli (4) 8	18.751	10	< .001
Ampli (27) 9	Ampli (4) 9	27.132	10	< .001
Ampli (27) 10	Ampli (4) 10	24.226	10	< .001
frequence (27)	frequence (4)	-8.239	10	< .001
frequence (27) 2	frequence (4) 2	-0.758	10	0.466
frequence (27) 3	frequence (4) 3	-2.630	10	0.025
frequence (27) 4	frequence (4) 4	-1.855	10	0.093
frequence (27) 5	frequence (4) 5	-0.806	10	0.439
frequence (27) 6	frequence (4) 6	0.555	10	0.591
frequence (27) 7	frequence (4) 7	1.763	10	0.108
frequence (27) 8	frequence (4) 8	1.192	10	0.261
frequence (27) 9	frequence (4) 9	2.947	10	0.015
frequence (27) 10	frequence (4) 10	1.978	10	0.076

Note. Test t de Student.

## Annexes 3 (Test Student)

#### Test t à deux échantillons appariés

27°C	4.3°C	t	Ddl	P	D de Cohen	ES d de Cohen
Index Fréquence (%) 27°C	Index Fréquence (%) 4,3°C	6.952	10	< .001	2.096	0.457

Note. Test t de Student.

## Annexes 4 (Test post-hoc).

### Tests post-hoc

Comparaisons post-hoc - Fréquence/100m interne au 1000m à 27°C

		Différence moyenne	ES	dl	t	P <sub>holm</sub>
1	2	1.685	0.692	10	2.434	1.000
	3	1.921	0.430	10	4.472	0.045
	4	2.165	0.437	10	4.951	0.023
	5	2.429	0.358	10	6.781	0.002
	6	2.296	0.475	10	4.831	0.027
	7	3.030	0.441	10	6.866	0.002
	8	3.544	0.350	10	10.139	< .001
	9	1.333	0.667	10	1.997	1.000
	10	2.175	0.438	10	4.962	0.023
2	3	0.236	0.518	10	0.456	1.000
	4	0.481	0.498	10	0.965	1.000
	5	0.745	0.582	10	1.279	1.000
	6	0.612	0.582	10	1.051	1.000
	7	1.345	0.581	10	2.314	1.000
	8	1.859	0.782	10	2.377	1.000
	9	-0.352	0.729	10	-0.483	1.000
	10	0.490	0.719	10	0.681	1.000
3	4	0.245	0.216	10	1.134	1.000
	5	0.508	0.200	10	2.546	0.872
	6	0.375	0.181	10	2.074	1.000
	7	1.109	0.153	10	7.229	0.001
	8	1.623	0.563	10	2.881	0.556
	9	-0.588	0.356	10	-1.653	1.000
	10	0.254	0.327	10	0.775	1.000
4	5	0.264	0.217	10	1.214	1.000
	6	0.131	0.169	10	0.774	1.000
	7	0.865	0.206	10	4.192	0.069
	8	1.378	0.505	10	2.730	0.699
	9	-0.833	0.521	10	-1.598	1.000
	10	0.009	0.482	10	0.019	1.000
5	6	-0.133	0.178	10	-0.745	1.000
	7	0.601	0.265	10	2.265	1.000
	8	1.115	0.492	10	2.264	1.000
	9	-1.096	0.409	10	-2.682	0.736
	10	-0.255	0.317	10	-0.802	1.000
6	7	0.734	0.181	10	4.055	0.083
	8	1.247	0.557	10	2.239	1.000
	9	-0.964	0.404	10	-2.382	1.000
	10	-0.122	0.416	10	-0.293	1.000
7	8	0.514	0.523	10	0.982	1.000
	9	-1.697	0.454	10	-3.741	0.134
	10	-0.855	0.422	10	-2.028	1.000
8	9	-2.211	0.850	10	-2.600	0.822
	10	-1.369	0.579	10	-2.366	1.000
9	10	0.842	0.376	10	2.238	1.000

Note. P-value adjusted for comparing a family of 45 estimates.

### Tests post-hoc

Comparaisons post-hoc - Fréquence/100m interne au 1000m à 4.3°C

		Différence moyenne	ES	dl	t	P <sub>holm</sub>
1	2	3.425	0.376	10	9.118	< .001
	3	3.450	0.382	10	9.036	< .001
	4	3.717	0.329	10	11.298	< .001
	5	4.344	0.391	10	11.106	< .001
	6	4.637	0.405	10	11.462	< .001
	7	5.621	0.464	10	12.107	< .001
	8	6.110	0.358	10	17.090	< .001
	9	4.566	0.690	10	6.617	0.002
	10	5.186	0.546	10	9.499	< .001
2	3	0.025	0.143	10	0.178	1.000
	4	0.293	0.233	10	1.257	1.000
	5	0.919	0.234	10	3.927	0.054
	6	1.213	0.297	10	4.089	0.044
	7	2.196	0.226	10	9.701	< .001
	8	2.685	0.415	10	6.475	0.002
	9	1.142	0.443	10	2.576	0.414
	10	1.762	0.415	10	4.242	0.039
3	4	0.267	0.214	10	1.247	1.000
	5	0.894	0.207	10	4.307	0.037
	6	1.187	0.286	10	4.144	0.042
	7	2.171	0.257	10	8.435	< .001
	8	2.660	0.440	10	6.043	0.004
	9	1.116	0.414	10	2.699	0.358
	10	1.736	0.411	10	4.223	0.039
4	5	0.626	0.094	10	6.632	0.002
	6	0.920	0.201	10	4.567	0.026
	7	1.904	0.301	10	6.321	0.003
	8	2.393	0.306	10	7.807	< .001
	9	0.849	0.529	10	1.605	1.000
	10	1.469	0.412	10	3.564	0.093
5	6	0.294	0.176	10	1.665	1.000
	7	1.277	0.262	10	4.881	0.018
	8	1.766	0.357	10	4.942	0.017
	9	0.223	0.468	10	0.476	1.000
	10	0.843	0.368	10	2.292	0.628
6	7	0.984	0.215	10	4.585	0.026
	8	1.473	0.315	10	4.681	0.023
	9	-0.071	0.461	10	-0.154	1.000
	10	0.549	0.293	10	1.873	0.996
7	8	0.489	0.406	10	1.204	1.000
	9	-1.055	0.381	10	-2.769	0.337
	10	-0.435	0.313	10	-1.388	1.000
8	9	-1.544	0.718	10	-2.150	0.742
	10	-0.924	0.522	10	-1.768	1.000
9	10	0.620	0.315	10	1.969	0.927

Note. P-value adjusted for comparing a family of 45 estimates.

## Annexes 5 (Corrélation pour régression linéaire).

### Corrélations de Pearson

Variable		Temps total 1000m (4,3°C)
1. Temps total 1000m (4,3°C)	R de Pearson	—
	p-value	—
2. Temps total 1000m (27°C)	R de Pearson	0.990
	p-value	< .001
3. IN moy 27°C	R de Pearson	-0.880
	p-value	< .001
4. F moy 27°C	R de Pearson	-0.760
	p-value	0.007
5. Age	R de Pearson	0.642
	p-value	0.033
6. Expérience	R de Pearson	-0.628
	p-value	0.039
7. IMC	R de Pearson	0.230
	p-value	0.496
8. Taille	R de Pearson	0.098
	p-value	0.775
9. Masse	R de Pearson	0.237
	p-value	0.482
10. A moy 27°C	R de Pearson	-0.590
	p-value	0.056

## Résumé français et anglais, mots clés

### Résumé

La natation en eau glacée, encadrée par l'International Ice Swimming Association, connaît un essor croissant. Toutefois, la littérature scientifique reste limitée concernant l'impact spécifique de l'eau glacée sur la performance, et aucune étude n'a comparé directement la performance sur 1000 mètres en bassin tempéré et en eau glacée. Ce mémoire poursuit un double objectif : analyser l'effet de l'eau glacée sur la performance et les paramètres techniques de nage, et élaborer une équation de prédiction de la performance en eau glacée à partir de la performance en bassin tempéré.

Onze nageurs (6 femmes, 5 hommes) ayant participé aux Championnats de France de nage en eaux glacées 2026 ont réalisé un 1000 mètres en eau glacée (4,3 °c) puis en bassin tempéré (27 °c). Le temps total, les temps de passage par 100 mètres, la fréquence gestuelle et l'amplitude de nage ont été mesurés. Les analyses ont été conduites sous JASP (tests t appariés, ANOVA à mesures répétées, régressions linéaires avec procédure de bootstrap).

Les résultats montrent une dégradation significative de la performance en eau glacée (+60 secondes en moyenne sur 1000 m), principalement portée par une chute immédiate et persistante de l'amplitude de nage dès le premier 100 m. La fréquence gestuelle moyenne reste stable, mais révèle une dynamique interne radicalement différente : chute de -17 % entre le premier et le dernier 100 m en eau glacée contre -7 % en bassin tempéré. L'IMC n'est pas corrélé à la dégradation de la performance sur cette distance. Deux modèles de prédiction ont été développés : un modèle simple (RMSE = 19,4 s) et un modèle multifactoriel (RMSE = 13,4 s) intégrant sept variables explicatives.

Ce travail apporte des éléments concrets pour l'entraînement et la préparation à la compétition en eau glacée, et ouvre la voie à de futures recherches dans un domaine encore largement inexploré.

**Mots-clés :** natation en eau glacée, performance, fréquence gestuelle, amplitude de nage, indice de masse corporelle, modèle de prédiction, eau froide

## **Abstract**

Ice swimming, regulated by the International Ice Swimming Association (IISA), has been growing rapidly in recent years. However, scientific literature remains limited regarding the specific impact of ice water on performance, and no study has directly compared 1000-metre performance in a tempered pool and in ice water. This master's thesis pursues a dual objective: to analyse the effect of ice water on performance and on swimming technical parameters, and to develop a prediction equation for ice swimming performance based on tempered pool performance.

Eleven swimmers (6 women, 5 men) who participated in the 2026 French Ice Swimming Championships completed a 1000-metre swim in ice water (4.6 °c) and in a tempered pool (27 °c). Total time, 100-metre split times, stroke rate and stroke length were measured. Statistical analyses were performed using JASP (paired t-tests, repeated-measures ANOVA, linear regressions with a bootstrap procedure).

Results show a significant decline in performance in ice water (+60 seconds on average over 1000 m), primarily driven by an immediate and persistent decrease in stroke length from the first 100 m. Mean stroke rate remained stable but revealed a radically different internal dynamic: a -17 % decrease between the first and the last 100 m in ice water, compared to -7 % in the tempered pool. Body mass index was not correlated with performance degradation over this distance. Two prediction models were developed: a simple model (RMSE = 19.4 s) and a multifactorial model (RMSE = 13.4 s) integrating seven explanatory variables.

This study provides concrete insights for training and competition preparation in ice swimming, and paves the way for future research in a field that remains largely unexplored.

**Keywords :** ice swimming, performance, stroke rate, stroke length, body mass index, prediction model, cold water