

Fiche projet Accord Cadre ZABR – Agence de l’eau

2024- OPEN_LAKES - Modélisation hydrodynamique 3D des lacs d’Annecy et du Bourget

INTITULE DU PROJET : Modélisation hydrodynamique 3D des lacs d’Annecy et du Bourget (OPEN_LAKES)

Responsable scientifique du projet:

- Nom : Victor
- Prénom : Frossard
- Organisme du contact : UMR CARTEL
- Fonction : MCF
- Courriel : victor.frossard@univ-smb.fr
- Téléphone : 04.79.75.88.68
-

Référent (s) administratif(s) :

- Nom : Deiber
- Prénom : Nathalie
- Organisme du contact : USMB
- Fonction : gestionnaire administratif
- Courriel : ddrv-autres-aap@univ-smb.fr
- Téléphone : 04.79.75.91.06

EQUIPES DE RECHERCHES ZABR CONCERNEES et CONTACT SCIENTIFIQUE DE L'EQUIPE
UMR EDYTEM (Alice Nikolli / alice.nikolli@univ-smb.fr)

AUTRES PARTENAIRES

(Préciser leur degré d'implication et leur accord)

Recherche : EAWAG (Damien Bouffard) : sous-traitance pour participer aux processus de calibration-validation modèles 3D, de leurs implémentations dans le site internet <https://www.alplakes.eawag.ch/> et dans la maintenance et développement du site internet.

THEMATIQUE NATURE ET OPERATION *(ne rien compléter)*

- Thématique : Etude recherche et réseau de suivi
- Nature du projet : Etude générale et recherche
- Type d'opération : Recherche et innovation
- **Intitulé de l'opération** : Modélisation hydrodynamique 3D des lacs d’Annecy et du Bourget

LOCALISATION DU PROJET: *(se remplit automatiquement -Ne rien remplir)*

- **Commune principale et numéro INSEE** : à compléter
- **Sous bassin versant** :
- **Nom du cours d'eau** :
- Contrat (si intégré dans un contrat de rivière, un SAGE ou un autre contrat avec l'agence de l'eau)

RESUME DU PROJET GLOBAL

- **Résumé :**

Le projet OPEN_LAKES a pour objectif de mettre à disposition de la communauté scientifique et, des gestionnaires et du grand public ou outil de prévisions thermiques spatialisées pour les lacs du Bourget

et d'Annecy. Les profils thermiques mensuelles de la colonne d'eau mesurés par le CARTEL au cours des dernières décennies dans les deux lacs (<https://si-ola.inrae.fr/>) seront complétés par 1) des mesures thermiques le long de transects, 2) des mesures en continu en zones littorales et 3) des mesures de courant. L'ensemble de ces données permettront de calibrer et valider des modèles hydrodynamiques 3D en utilisant le logiciel Delft3D-FLOW et en considérant différentes variables du modèle météorologique COSMO-1, les caractéristiques des affluents (débit, température) et la cote des lacs comme forçages externes. Les prévisions thermiques spatialisées à 5 jours seront produites en utilisant le modèle de prévisions météorologiques COSMO-E ainsi que les moyennes pluri-annuelles des débits et températures des affluents et de la cote des lacs sur une grille spatiale de 150 m. Les prévisions thermiques seront bancarisées, disponibles et visualisation via le site internet <https://www.alplakes.eawag.ch/>. Une enquête auprès des usagers permettra comprendre le rôle de la variable thermique dans la fréquentation de l'espace lacustre par le grand public et d'affiner ses attentes vis-à-vis de la mise à disposition d'informations thermiques. Un outil pédagogique hybride sera développé à l'interface « Science physique – Sensibilisation à l'Environnement » en collaboration avec des enseignants de Lycée qui utilisera les données issues des prévisions thermiques. Ce projet s'inscrit dans le cadre d'une mise à niveau des outils et plateformes scientifiques facilitant : 1) l'utilisation des données thermiques par la communauté scientifique, 2) l'accessibilité aux caractéristiques thermiques des lacs par le grand public, 3) l'utilisation des données scientifiques à des fins pédagogiques pour un transfert de compétences de la recherche vers l'enseignement secondaire. Cette démarche pourrait être étendu à tout écosystème lacustre d'intérêt.

• **Coût total du projet :**

ENCART 2025-2026-USMB (CARTEL-EDYTEM) (Victor Frossard) – Les tâches de l'équipe seront :

- CDD IR + scientifiques
 - Collecter – nettoyer - bancariser l'ensemble des données disponibles pour caractériser la thermie des lacs d'Annecy et du Bourget auprès des gestionnaires, des fédérations de pêche et du système d'information OLA
 - Collecter – nettoyer - bancariser l'ensemble des données disponibles pour caractériser les débits et les températures des affluents des lacs ainsi que les cotes auprès d'Hydroportail, des gestionnaires et des fédérations de pêche
 - Campagnes de terrain pour caractériser la courantologie des lacs, la température sur des sections des lacs (transects bathymétriques), instrumenter 2 sites par lacs pour caractériser les profils thermiques littoraux haute fréquence.
 - Nettoyer - bancariser l'ensemble des données thermiques et courantologiques des campagnes de terrain effectuées.
 - Collaborer avec l'EAWAG pour calibrer et valider les modèles hydrodynamiques 3D
- CDD M2 + scientifiques
 - Enquête sur les pratiques et les attentes du grand public vis-à-vis des données thermiques spatialisées
- Scientifiques + enseignant de Lycée
 - Construire un outil pédagogique hybride à l'interface entre « Science et Education à l'environnement » en interaction avec un professeur de physique en Lycée utilisant les données thermiques spatialisées issues des modèles hydrodynamiques 3D développés et disponibles sur le site internet <https://www.alplakes.eawag.ch/>.

ENCART 2025-2026-INRAE (CARTEL) (Orlane Anneville) - Les tâches de l'équipe seront :

- Techniciens + scientifiques
 - Participation aux campagnes de terrain
 - Collaborer avec l'EAWAG pour calibrer et valider les modèles hydrodynamiques

CONTEXTE SCIENTIFIQUE

• **Contexte général**

Les grands lacs alpins français jouent un rôle socio-économique majeur pour leurs territoires aux échelles locales et régionales, tout en rayonnant à l'échelle nationale, voire internationale. Les connaissances des caractéristiques thermiques spatialisées de ces écosystèmes restent parcellaires limitant notre capacité à quantifier leurs réponses au changement climatique qui peuvent affecter directement leurs états écologiques et *in fine* les services rendus aux sociétés humaines. Une plateforme de recherche impliquant des modélisations hydrodynamiques 3D de 12 grands lacs alpins est développée de façon continue par un consortium de recherche piloté par l'EAWAG depuis une décennie menant à la mise à disposition via le site internet <https://www.alplakes.eawag.ch/> de prévisions thermiques spatialisées à court terme (5 jours) associées à des outils de visualisation et d'accès facilité aux données pour les scientifiques, les gestionnaires et le grand public (Baracchini et al. 2020). L'intégration des deux grands lacs alpins français d'Annecy et du Bourget dans cette plateforme de recherche, via le projet OPEN_LAKES, représente un enjeu stratégique majeur pour opérer un saut qualitatif dans notre capacité à appréhender les réponses thermiques des grands lacs alpins français face au changement climatique. De plus, ce saut qualitatif permettrait d'apporter un soutien sans précédent aux actions de recherche menées sur ces écosystèmes et d'aborder sous une facette nouvelle et interactive la manière de communiquer, d'informer et d'éduquer différents publics (gestionnaires et grand public, élèves de différents niveaux scolaires) sur les caractéristiques thermiques de ces deux grands lacs alpins français et leurs réponses au changement climatique.

- **Contexte ZABR :**

- **Thématique ZABR :**

Le projet OPEN_LAKES s'intègre dans le thème ZABR « Changement Climatique et Ressource » et permettra de contribuer aux thématiques ZABR suivantes :

« **Comment les séries de données de différentes profondeurs temporelles permettent-elles de comprendre et anticiper les réponses des hydrosystèmes au changement climatique ?** ».

Le calage et l'intégration dans ALPLAKES des modèles hydrodynamiques 3D produiront des prévisions thermiques spatialisées à 5 jours permettant d'étudier les impacts du changement climatiques et d'événements climatiques particuliers (tempête, canicule, orages) sur la spatialisation thermique des eaux des lacs.

« **Quels sont les impacts du changement global sur les ressources, sur le fonctionnement et les capacités de résilience des écosystèmes aquatiques ?** »

Les prévisions thermiques spatialisées seront bancarisées et disponibles en accès libre via le site internet <https://www.alplakes.eawag.ch/> permettant une appropriation des prévisions des modèles à la fois par la communauté scientifique et par le grand public, ainsi que par les élèves de différents niveaux scolaires. Ces prévisions de températures pourront contribuer à développer des investigations scientifiques permettant de répondre aux objectifs suivants de cette thématique ZABR : (1) *examiner la sensibilité des systèmes aquatiques continentaux aux variations et évolutions climatiques*, (2) *déterminer les impacts du réchauffement climatique sur les écosystèmes aquatiques* et (3) *identifier d'éventuels points de rupture dans les fonctionnements des hydrosystèmes du fait d'évolution du climat*.

- **Site Atelier ou Observatoire ZABR :**

Lac du Bourget / Lac d'Annecy

- **Besoin de connaissance Agence de l'eau :**

Le projet OPEN_LAKES s'inscrit dans 2 axes thématiques de l'accord cadre ZABR-AE RMC :

Thème I « Les risques environnementaux et la vulnérabilité des milieux ». Le projet permettra de mesurer les réponses thermiques des deux lacs à la météorologie locale et aux événements météorologiques extrêmes locaux. La production de prévisions thermiques spatialisées permettra de quantifier leur vulnérabilité face au changement climatique. De ce fait le projet répond aux besoins de connaissances identifiés de cet axe thématique concernant :

- *l'impact des changements globaux notamment le changement climatique sur le fonctionnement des milieux et ses incidences en termes de gestion*
- *la caractérisation des trajectoires évolutives des systèmes,*
- *les processus déclencheurs et les conséquences de l'eutrophisation,*
- *les indicateurs de services sociologiques et environnementaux rendus par les processus naturels.*

Thème II « La protection, la restauration des milieux et les gains écologiques ». Le projet soutiendra la production et la bancarisation de données thermiques spatialisées en libre accès pour les gestionnaires et l'ensemble des acteurs en charge des actions de protection, de restauration et de connaissances sur les lacs et contribuera donc aux besoins de connaissances pour évaluer l'efficacité des actions de ce thème.

Plus généralement, le projet OPEN_LAKES s'inscrit dans le cadre des besoins de l'AE RMC relatifs aux « **Incidences et adaptations au changement climatique** » en contribuant à l'apport de connaissances et au développement d'outils opérationnels pour « *Evaluer l'impact du changement climatique sur les écosystèmes et la biodiversité* » et « *Analyser la vulnérabilité des territoires au changement climatique sous l'angle socio-économique et politique* ».

Le projet aura aussi une portée transversale et pourrait de ce fait s'inscrire dans les « **Thématiques transversales** » bien que les questions recensées de ce thème ne correspondent pas directement au projet puisqu'un audit auprès du grand public sera réalisé concernant ses attentes vis-à-vis des informations attendues / espérées relatives aux caractéristiques thermiques des lacs et aux conséquences de leur utilisation sur la fréquentation sera réalisé. Complémentairement, l'utilisation des données disponibles dans un cadre pédagogique via le développement d'une activité pédagogique hybride à l'interface entre la sensibilisation à l'environnement et la physique appliquée en partenariat avec un enseignant de l'enseignement secondaire (Lycée).

FINALITE ET ATTENDUS OPERATIONNELS

• Objectifs scientifiques

L'objectif prioritaire du projet OPEN_LAKES sera de calibrer et valider deux modèles hydrodynamiques 3D pour les lacs d'Annecy et du Bourget en utilisant le logiciel Delft3D-FLOW (Deltares 2024). Pour ce faire, les conditions d'états thermiques et hydrodynamiques des deux lacs déjà disponibles (<https://si-ola.inrae.fr/>) seront complétées par la collecte de nouvelles données durant les phases de terrain au cours des 2 années du projet. Les modèles hydrodynamiques seront calibrés à partir de données d'entrée issue du modèle météorologique COSMO-1 (MeteoSwiss 2024a). Les prévisions thermiques seront quant à elles obtenues en utilisant les données issues du modèle météorologique de prévisions COSMO-E (MeteoSwiss 2024b). Les données thermiques et de débit des affluents des lacs, les cotes des lacs disponibles auprès de différentes structures (Hydroportail (<https://hydro.eaufrance.fr/>), gestionnaires (CISALB et SILA), fédérations de pêche) seront aussi utilisées pour calibrer, valider les modèles et pour conduire les prévisions thermiques.

L'objectif secondaire du projet, sur un versant SHS, consiste à comprendre le lien entre conditions thermiques lacustres et modalités de fréquentation des lacs par le grand public, et à interroger le poids de la variable thermique par rapport à d'autres facteurs, que ceux-ci soient relatifs aux différents types d'espaces littoraux (accessibilité, aménagements, etc.) ou aux usagers eux-mêmes (activités pratiquées, habitudes, etc.). L'enquête permettra également d'identifier les attentes du grand public vis-à-vis de la mise à disposition de prévisions thermiques spatialisées.

• Attendus opérationnels

Le projet OPEN_LAKES comprend 3 objectifs opérationnels :

- 1) L'implémentation des 2 modèles hydrodynamiques sur le site internet <https://www.alplakes.eawag.ch/> permettant la mise à disposition en accès libre pour tout utilisateur (scientifique, gestionnaire, particulier) des prévisions thermiques spatialisées couplées à des visualisations attractives via l'API du site internet. Ces données étant bancarisées, leur utilisation *a posteriori* sera possible.
- 2) Une enquête sur la fréquentation de l'espace lacustre et sur les attentes des usagers des lacs vis-à-vis de l'accès en temps réel aux conditions thermiques spatialisées des lacs.
- 3) Un outil pédagogique hybride à l'interface « Science et Education à l'environnement » pour élèves de Lycée mobilisant les connaissances en physique (dynamique des fluides) sera développé en coopération avec un enseignant en Lycée.

NOTE : Le développement en continu de la plateforme de recherche ALPLAKES permettra que l'ensemble des futures avancées scientifiques et méthodologiques en termes de
--

modélisation, de disponibilité et de visualisation des données puissent être implémentées pour les lacs du Bourget et d'Annecy à l'avenir. En ce sens, le projet OPEN_LAKES s'inscrit dans une démarche collaborative à long-terme des laboratoires CARTEL et EDYTEM avec l'ensemble du consortium scientifique de la plateforme de recherche ALPLAKES. Il est ainsi attendu que les modèles hydrodynamiques feront l'objet d'amélioration progressives au cours du temps.

Ces modèles hydrodynamiques 3D pourraient supporter l'utilisation de projections climatiques à long terme afin d'évaluer l'impact de scénarios de changements climatiques (e.g. ISIMIP3BASD, Cucchi et al. 2020; Lange 2019) sur la spatialisation des températures. Les données et codes informatiques (setup, modèles 3D) seront accessibles sans restriction (langage informatique python) pour éventuellement investiguer les conséquences à long-terme du changement climatique sur la dynamique thermique spatialisée des lacs étudiés. Ce travail prospectif pourra ainsi être fait à n'importe quel moment par un(e) scientifique.

DESCRIPTIF DETAILLE

• Implémentation des modèles hydrodynamiques 3D dans ALPLAKES

Une présentation détaillée de l'implémentation des modèles hydrodynamiques au sein du site internet <https://www.alplakes.eawag.ch/> identifiant l'ensemble des procédures depuis l'acquisition des données jusqu'à la mise à disposition des prévisions thermiques spatialisées pour les utilisateurs est disponible dans (Baracchini et al. 2020).

Les dynamiques thermiques spatiales issues modèles hydrodynamiques 3D pour les lacs d'Annecy et du Bourget pour la grille spatiale préalablement établie sera conduite en suivant le pipeline de programmation informatique (python) développé par l'EAWAG et utilisé pour les lacs déjà intégrés dans <https://www.alplakes.eawag.ch/> en mobilisant le logiciel Delft3D-FLOW (Deltares 2024). Ce logiciel, comme d'autres solveurs hydrodynamiques, permet de résoudre l'évolution des conditions thermiques et de courantomologies dans les lacs.

L'ensemble de l'implémentation des modèles 3D fera l'objet d'une sous-traitance avec l'équipe de physique aquatique dirigée par Damien Bouffard à l'EAWAG (<https://www.eawag.ch/en/departement/surf/main-focus/aquatic-physics/>) permettant une collaboration étroite avec l'ingénieur de recherche qui sera recruté et les autres membres scientifiques du projet.

○ Résolution spatiale

Les données bathymétriques des deux lacs disponibles d'après (Ledoux et al. 2010) pour le Bourget (résolution spatiale 10 m) et d'après (BRGM/SILA 1990) pour Annecy (résolution spatiale 50 m) supporteront la création une grille spatiale (xy) de 150 m de côté comprenant 100 couches de hauteurs inégales (z) variant de 20 cm à la surface à plusieurs mètres pour les plus grandes profondeurs (plus faible variabilité thermique et hydrodynamique en profondeur) au sein desquelles les prévisions thermiques seront produites.

○ Calibration des modèles hydrodynamiques

Les modèles seront calibrés pour les paramètres suivants : l'échelle de longueur d'Ozmidov (pour la fermeture de turbulence), les termes de viscosité horizontal et de diffusivité de fond ainsi que les coefficients de convection libre et de traînée du vent. L'ensemble de ces paramètres sont clés dans Delft3D-FLOW pour projeter l'évolution spatiale des températures. Nous utiliserons la procédure automatisée DYNO_PODS développée par Xia et al. (2021, 2022) pour calibrer ces paramètres. Une telle procédure est basée sur une méthode d'optimisation globale de substitution parallèle appelée Parallel Optimization with Dynamic coordinate search using Surrogates (PODS, Xia et al. 2021), qui permet de calibrer plusieurs paramètres simultanément en exécutant des simulations parallèles et en trouvant le meilleur résultat à chaque itération basée sur une fonction de coût à minimiser. Nous avons pu obtenir des résultats satisfaisant avec cette approche en utilisant les données de suivi classique des lacs (e.g. profils bi-mensuel de température).

Les conditions d'états thermiques et hydrodynamiques des deux lacs servant à calibrer les modèles hydrodynamiques seront :

- 1) Les suivis thermiques de l'ensemble de la colonne d'eau des lacs issues des suivis mensuels à long-terme (> 10 ans) disponibles via le système d'information « Observatoire des Lacs » maintenu par le laboratoire CARTEL (<https://si-ola.inrae.fr/>).
- 2) Les chroniques thermiques (pas de temps horaires) des zones littorales allant de quelques mois à plusieurs années bancarisées sur 1 à 3 sites par lacs par les gestionnaires (CISALB et SILA) et les fédérations de pêche (FDAAPPMA73 et 74).
- 3) Les suivis thermiques qui seront spécifiquement conduits durant le projet au niveau des zones littorales : matériel spécifique sondes thermiques Tinytag / 2 sites par lacs / 5 profondeurs 1 m et 5 m, 10 m, 15 m, 20 m / durée de suivi = 5 mois de Mai à Septembre permettant d'encadrer la période estivale pour laquelle les enjeux écologiques et sociétaux sont les plus forts / pas de temps d'enregistrement horaires.
- 4) Les suivis hydrodynamiques qui seront spécifiquement conduits durant le projet au niveau des deux sites de suivis thermiques *In Situ* (3) : matériel spécifique profileur acoustique Aquadopp (ADCP) de 2MHz positionné à 20 m de profondeur enregistrant la direction (°N) et l'intensité (cm s^{-1}) des déplacements d'eau sur l'ensemble de la colonne d'eau au sein de cellules de 50 cm de hauteur avec un pas de temps horaire / 2 sites par lacs / durée de suivi = 2 mois, Juillet et Août permettant d'encadrer la période estivale pour laquelle les enjeux écologiques et sociétaux sont les plus forts.

Les variables de forçage des modèles hydrodynamiques seront les variables suivantes aux périodes temporelles pour lesquelles les données thermiques et, pour certaines séquences temporelles, hydrodynamiques seront disponibles:

- 1) Sept variables météorologiques (vitesse du vent, direction du vent, rayonnement solaire, pression atmosphérique, couverture nuageuse, humidité relative, température de l'air) issues du modèle météorologiques COSMO-1 (résolution spatiale 1.1 km², résolution temporelle horaire, (MeteoSwiss 2024a).
- 2) Les débits et températures des affluents des lacs. Les débits des cours d'eau seront obtenus sur Hydroportail (<https://hydro.eaufrance.fr/>) et les données thermiques seront les moyennes journalières calculées d'après les données fournies par les fédérations de pêche (FDAAPPMA73 et 74) ainsi que par les gestionnaires des lacs (CISALB, SILA).
- 3) Les côtes des lacs seront fournies par la compagnie nationale du Rhône (CNR, exploitant des eaux de sortie du lac) pour le lac du Bourget et par le SILA (gestionnaire du lac) pour le lac d'Annecy.

○ Validation des modèles

La validation des modèles sera effectuée en utilisant différents segments de chroniques de températures littorales fournies par les gestionnaires, les fédérations de pêche ou mesurées *In situ* durant le projet mais aussi avec des segments chroniques thermiques sur l'ensemble de la colonne d'eau issu du SI OLA. Un objectif d'erreur absolue moyenne (MAE) de 1.5°C est visé dans un premier temps de validation. A noter qu'il est prévu d'implémenter un module d'assimilation de données satellites dans Alplakes. Cette future amélioration bénéficiera naturellement aux modèles des lacs du Bourget et d'Annecy. Ce module ne fait pas parti de cette demande et est entièrement financé par le partenaire de l'Eawag.

○ Prévisions des modèles

Les simulations hydrodynamiques en 3D seront exécutées quotidiennement. Chaque jour, le système calculera l'hydrodynamique du lac en commençant arbitrairement à partir du dimanche précédent à 00h00, en utilisant les réanalyses météorologiques de surface COSMO-1 et les observations des affluents. Les prévisions thermiques spatialisées à 5 jours s'appuieront sur les sept variables météorologiques précédemment citées issues de COSMO-E (MeteoSwiss 2024b) qui fournit des prévisions horaires sur 120 h, à une résolution de grille spatiale réduite (2,2 km). En attendant un transfert en temps réel des débits et des températures des affluents ainsi que des cotes des lacs et des prévisions associées, des moyennes historiques journalières de ces variables de forçage calculées sur plusieurs années seront utilisées dans un premier temps.

○ Mise en ligne des prévisions des modèles

Lorsque les modèles hydrodynamiques seront validés, un espace dédié sera développé pour chaque lac dans le site <https://www.alplakes.eawag.ch/> permettant une visualisation en temps réel des prévisions thermiques spatialisées.

○ **Disponibilité des données thermiques**

Lorsque la mise en ligne sera effective, l'ensemble des prévisions thermiques seront bancarisées dans le serveur hébergeant le site <https://www.alplakes.eawag.ch/> et mise à disposition pour tout utilisateur via l'API (Application Programming Interface) du site (<https://www.alplakes.eawag.ch/api>). Toutes les données produites par le modèle sont en accès libre.

• **Enquête auprès des usagers et des gestionnaires des lacs**

Une enquête par questionnaire sera conduite auprès de différents profils d'usagers des lacs, en tenant compte de la diversité afférente à leur provenance (riverains, excursionnistes, touristes), à leurs pratiques (baignade, plongée, activités nautiques motorisées ou non, pêche de loisir, pêche professionnelle, etc.) et à leurs caractéristiques socio-démographiques (âge, genre, catégorie socio-professionnelle, etc.). Le questionnaire permettra de documenter 1) les facteurs déterminant la répartition spatio-temporelle de la fréquentation du lac (liés ou non aux conditions thermiques lacustres) ; 2) le lien que les différentes pratiques entretiennent avec les conditions thermiques, 3) les attentes des différents profils d'usagers concernant les informations relatives à la température de l'eau des lacs, 4) la manière dont des informations en temps réel concernant les températures spatialisées des lacs pourraient impacter leur fréquentation. La passation du questionnaire aura lieu de juin à août, en adéquation avec la saisonnalité de la fréquentation maximale du lac. Elle sera à la fois réalisée *in situ* et relayée en ligne, via les structures encadrant les principaux usages ciblés. Des entretiens exploratoires avec les acteurs socio-professionnels (offices de tourisme, associations d'usagers, clubs sportifs, etc.) seront réalisés en amont afin d'optimiser la construction du questionnaire et la planification de la passation (échantillonnage des sites de passation en fonction de la répartition spatiale des pratiques et du niveau de fréquentation des différents secteurs).

En parallèle, une dizaine d'entretiens semi-directifs seront réalisés avec les gestionnaires des lacs (CISALB, DDT, gestionnaires de plages, de ports, etc.) pour identifier leurs attentes vis-à-vis de données thermiques spatialisées (orientation des actions de gestion et de développement, utilisation thermique des lacs, par ex. géothermie <https://thermdis.eawag.ch/en/technique>).

En considérant le temps imparti pour la réalisation du stage de M2, les enquêtes et les entretiens seront prioritairement réalisés pour le lac du Bourget.

• **Outil pédagogique hybride « Science – Education à l'Environnement »**

Un outil pédagogique hybride à l'interface « Science – Sensibilisation à l'Environnement » sera élaboré en collaboration avec un enseignant de Lycée en vue de mettre en pratique de façon originale les principes de mécanique des fluides au programme des enseignements. Cet outil pédagogique pourra prendre la forme d'un projet en autonomie et mobilisera les données produites par les modèles et accessibles sur le site <https://www.alplakes.eawag.ch/>. En ce sens, cette tâche du projet constituera un transfert des outils et connaissances scientifiques de la communauté des chercheurs vers le grand public, en l'occurrence vers l'enseignement secondaire.

LIVRABLES :

Les 4 livrables prévus pour le projet OPEN_LAKES sont :

- Implémentation de deux modèles hydrodynamiques 3D pour les lacs d'Annecy et du Bourget sur le site internet <https://www.alplakes.eawag.ch/> permettant 1) la visualisation spatialisée des prévisions des températures et des courants du lac / plage de visualisation : instantané jusqu'à 4.5 jours dans le futur et 2) l'extraction des données modélisées via l'API ALPLAKES à des fins d'usage scientifique, grand public et pédagogique.
- Rapport de synthèse et fiche de synthèse concernant l'ensemble des investigations menées pour aboutir à l'implémentation des deux modèles hydrodynamiques 3D pour les lacs d'Annecy et du Bourget sur le site internet <https://www.alplakes.eawag.ch/>.
- Rapport de stage relatif à l'enquête auprès des usagers des lacs (grand public, nautisme, plongée, pêche) et aux entretiens auprès des gestionnaires sur l'utilisation des prévisions thermiques spatialisées pour les deux lacs (objectifs d'utilisation, attentes), prioritairement réalisé pour le lac du Bourget.
- Activité pédagogique hybride à l'interface « Science – Education à l'environnement » portant sur la mécanique des fluides et utilisant l'API ALPLAKES et les données modélisées.

DUREE DU PROJET:

- Date de début : 01/03/2025
- Date de fin : 01/03/2027

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Baracchini, T., A. Wüest & D. Bouffard, 2020. Meteolakes: An operational online three-dimensional forecasting platform for lake hydrodynamics. *Water Research* 172:115529 doi:<https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115529>.
- BRGM/SILA, 1990. Carte bathymétrique du lac d'Annecy. rapport BRGM n° R 31477.
- Cucchi, M., G. P. Weedon, A. Amici, N. Bellouin, S. Lange, H. Müller Schmied, H. Hersbach & C. Buontempo, 2020. WFDE5: bias-adjusted ERA5 reanalysis data for impact studies. *Earth Syst Sci Data* 12(3):2097-2120 doi:10.5194/essd-12-2097-2020.
- Deltares, 2024. Delft3D-FLOW User Manual: Simulation of Multi-Dimensional Hydrodynamic Flows and Transport Phenomena. Delft Netherlands.
- Lange, S., 2019. Trend-preserving bias adjustment and statistical downscaling with ISIMIP3BASD (v1.0) *Geoscientific Model Development* 12:3055-70.
- Ledoux, G., P. Lajeunesse, E. Chapron & G. St-Onge, 2010. Multibeam Bathymetry Investigations of Mass Movements in Lake Le Bourget (NW Alps, France) Using a Portable Platform. *Submarine Mass Movements and Their Consequences*:423-434.
- MeteoSwiss, 2024a. COSMO-1 High-resolution forecasts for the Alpine region. accessed 16/03/2024 <https://www.meteoswiss.admin.ch/home/measurement-and-forecasting-systems/warning-and-forecasting-systems/cosmo-forecasting-system/cosmo-1-high-resolution-forecasts-for-the-alpine-region.html>.
- MeteoSwiss, 2024b. COSMO-E probabilistic forecasts for the Alpine region. accessed 16/03/2024 <https://www.meteoswiss.admin.ch/home/measurement-and-forecasting-systems/warning-and-forecasting-systems/cosmo-forecasting-system/cosmo-e-probabilistic-forecasts-for-the-alpine-region.html>.
- Xia, W., T. Akhtar & C. A. Shoemaker, 2022. A novel objective function DYNO for automatic multivariable calibration of 3D lake models. *Hydrol Earth Syst Sci* 26(13):3651-3671 doi:10.5194/hess-26-3651-2022.
- Xia, W., C. Shoemaker, T. Akhtar & M.-T. Nguyen, 2021. Efficient parallel surrogate optimization algorithm and framework with application to parameter calibration of computationally expensive three-dimensional hydrodynamic lake PDE models. *Environmental Modelling & Software* 135:104910 doi:<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104910>.