

Surveillance Hydro-Climatique Régionale : Conception D'une Plateforme Pour La Région Itasy

RANDRIANJA Malanto Miangaly¹, RALIJAONA Herilala Tafitasoloniaina², RAKOTOMAHEVITRA Andrianelison³

¹ Informatique Department, University of Itasy,
Soavinandriana, Madagascar
miangalirandrianja@gmail.com

² Informatique Department, Water and Environmental Engineering Department, University of Itasy,
Soavinandriana, Madagascar
tafitaralijaona@gmail.com

³ Engineering Science, Department of Renewable Energy, University of Itasy,
Soavinandriana, Madagascar
andri.rakotomahevitra@gmail.com

Corresponding Author: RALIJAONA Herilala Tafitasoloniaina. E-mail: tafitaralijaona@gmail.com



Résumé : Ce travail porte sur la conception et la mise en place d'une plateforme de suivi hydro-climatique pour la région Itasy. Face aux perturbations environnementales qui affectent cette zone telles que la variabilité des précipitations, la réduction de la surface du lac Itasy, l'érosion et les pressions sur les ressources en eau, l'objectif est de proposer un outil intégré d'observation, d'analyse et de prévision. La plateforme combine plusieurs sources d'information : données satellitaires (Sentinel-2, ERA5-Land), observations locales (capteurs, mesures manuelles) et modélisation avancée. Elle offre ainsi des fonctionnalités allant de la consultation des prévisions météorologiques pour les agriculteurs jusqu'à l'analyse historique et prédictive pour les chercheurs et décideurs. Grâce à ses modèles numériques avancés et à sa capacité de surveillance des surfaces lacustres en utilisant des indices satellitaires clés comme le NDWI et le NDVI, la plateforme offre une compréhension fine des dynamiques hydrologiques du lac Itasy. Ce projet ouvre également la voie à l'avenir en envisageant l'intégration de données satellitaires commerciales de pointe. L'objectif est de permettre un suivi quasi en temps réel et à très haute résolution, ce qui constitue une avancée majeure.

Mot clés : Hydro-climatologie, Télédétection, Plateforme numérique, Lac Itasy, Gestion des ressources en eau

Abstract: This work focuses on the design and implementation of a hydro-climatic monitoring platform for the Itasy region. In response to environmental disturbances affecting this area, such as precipitation variability, reduction of Lake Itasy's surface area, erosion, and pressure on water resources, the objective is to provide an integrated tool for observation, analysis, and forecasting. The platform combines multiple sources of information: satellite data (Sentinel-2, ERA5-Land), local observations (sensors, manual measurements), and advanced modeling. It thus offers functionalities ranging from weather forecast consultation for farmers to historical and predictive analysis for researchers and decision-makers. Thanks to its advanced numerical models and its capability to monitor lake surfaces using key satellite indices such as NDWI and NDVI, the platform provides a detailed understanding of the hydrological dynamics of Lake Itasy. This project also paves the way for future developments by considering the integration of high-resolution commercial satellite data. The goal is to enable near real-time monitoring at very high resolution, representing a significant advancement.

Keywords: Hydroclimatology, Remote Sensing, Digital Platform, Lake Itasy, Water Resource Management

1. INTRODUCTION

La région Itasy, située au centre-ouest de Madagascar, constitue un territoire à fort potentiel hydrologique, marqué par la présence du lac Itasy, l'un des plus grands lacs naturels du pays, ainsi que par un dense réseau hydrographique. Cette région est principalement rurale et dépend fortement de l'agriculture pluviale, de la pêche et de l'élevage, activités directement influencées par les conditions hydro-climatiques.

Cependant, depuis plusieurs années, la région subit des perturbations environnementales notables [1]. Parmi celles-ci, on relève :

- Une variabilité accrue des précipitations ;
- Des phénomènes de sécheresse plus fréquents ;
- Une réduction apparente de la surface du lac Itasy pendant certaines saisons sèches ;
- Une érosion croissante des berges et la sédimentation progressive du lac ;
- Et une pression croissante sur les ressources en eau liée à l'accroissement démographique et au développement agricole.

Ces perturbations soulèvent des enjeux cruciaux de gestion intégrée des ressources en eau, de suivi environnemental, et de prévision des risques. Elles posent ainsi la question centrale : comment mieux observer, comprendre et anticiper les évolutions hydro-climatiques dans cette région vulnérable ?

Dans un contexte de changement climatique global, les dynamiques hydrologiques locales deviennent de plus en plus imprévisibles. À Itasy, l'absence de réseau dense de stations hydrométéorologiques constitue un obstacle majeur à la collecte de données fiables et continues sur les précipitations, les températures, les niveaux d'eau ou les débits. Or, ces données sont essentielles pour la planification agricole, la prévention des risques hydrologiques (crues, sécheresses), et la gestion durable des ressources naturelles.

En ce qui concerne le cœur battant de la région qui est le Lac Itasy, différentes études et observations des riverains ont souligné une détérioration progressive de sa qualité, une diminution considérable de la biodiversité aquatique et une augmentation des conflits d'usage autour de l'eau. Malgré ces constats, aucune plateforme numérique intégrée n'est actuellement disponible à l'échelle régionale pour visualiser, croiser et exploiter les données hydro-climatiques disponibles (données satellitaires, observations locales, historiques climatiques...).

C'est ainsi que la mise en place d'une plateforme de suivi hydro-climatique constitue une avancée innovante majeure. En s'appuyant sur les technologies de l'information, la télédétection et la modélisation environnementale, elle apportera des éclaircissements essentiels sur l'évolution des précipitations dans la région Itasy, les modifications de la surface du lac face aux pressions climatiques, ainsi que sur l'évaluation des apports d'eau par bassin versant afin de mieux cerner les vulnérabilités des populations locales. Cette démarche impose une approche intégrée associant climatologie, hydrologie et observation de terrain, afin de mieux comprendre les dynamiques du bassin versant et les pressions multiples qui affectent l'équilibre du lac. Son objectif est de rendre ces informations stratégiques pleinement accessibles et exploitables par un large éventail d'utilisateurs, des décideurs aux chercheurs, en passant par les techniciens et les agriculteurs.

2. Méthodologie et paramètres de surveillance

2.1 Système d'acquisition de données

Grâce au soutien de partenaires tels que la Région Nouvelle-Aquitaine et l'association européenne Initiative Développement (ID), via le projet PAGLI II, plusieurs stations météorologiques ont été installées dans la région Itasy. Ces stations sont placées sous la supervision de l'Université de l'Itasy, qui en assure le pilotage local.

Par ailleurs, dans le cadre du même projet PAGLI II, l'Université de l'Itasy a été dotée, à travers son Institut et Observatoire Hydro-climatique, d'équipements de suivi des paramètres physico-chimiques du lac Itasy, ainsi que de capteurs pour la mesure de la bathymétrie des lacs, contribuant ainsi à la construction d'une base de données scientifique fiable et durable pour l'aide à la décision.

La plateforme de suivi hydro-climatique de l'Itasy repose sur un réseau intégré de capteurs déployés à travers la région. Elle comprend :

- ❖ Deux stations météorologiques automatiques complètes : la première est installée dans l'enceinte du campus universitaire de l'Université de l'Itasy, et la seconde sera bientôt placée sur l'îlot de la Vierge au cœur du Lac Itasy. En complément, la Direction Générale de la Météorologie Malagasy (DGM), en collaboration avec le projet DYNAMICS, prévoit l'installation d'une station météorologique automatique sur le campus de l'Université le 3 septembre 2025, dont la gestion sera assurée par les équipes universitaires sous la direction de l'Institut et Observatoire Hydro-climatique de la région Itasy.



figure 1 Station météo _ Université de l'Itasy

- ❖ Des capteurs hydro-climatiques mobiles installés sur un drone flottant dédié à la navigation sur le Lac Itasy. Ces capteurs mesurent en continu les caractéristiques physico-chimiques du Lac, qui seront présentées dans la suite du document.

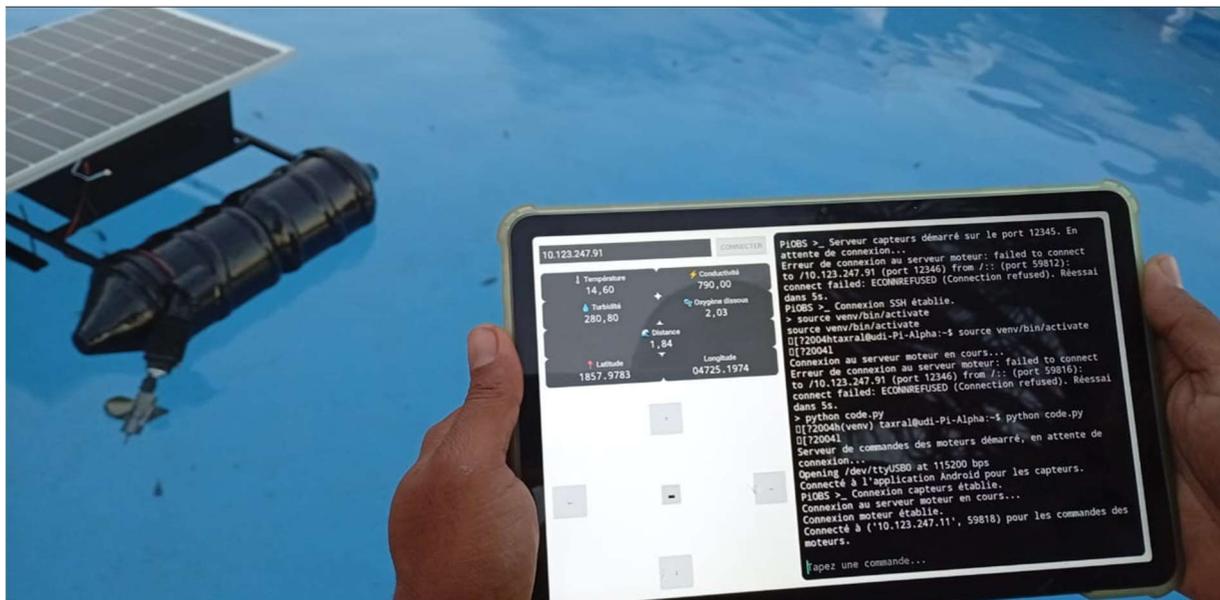
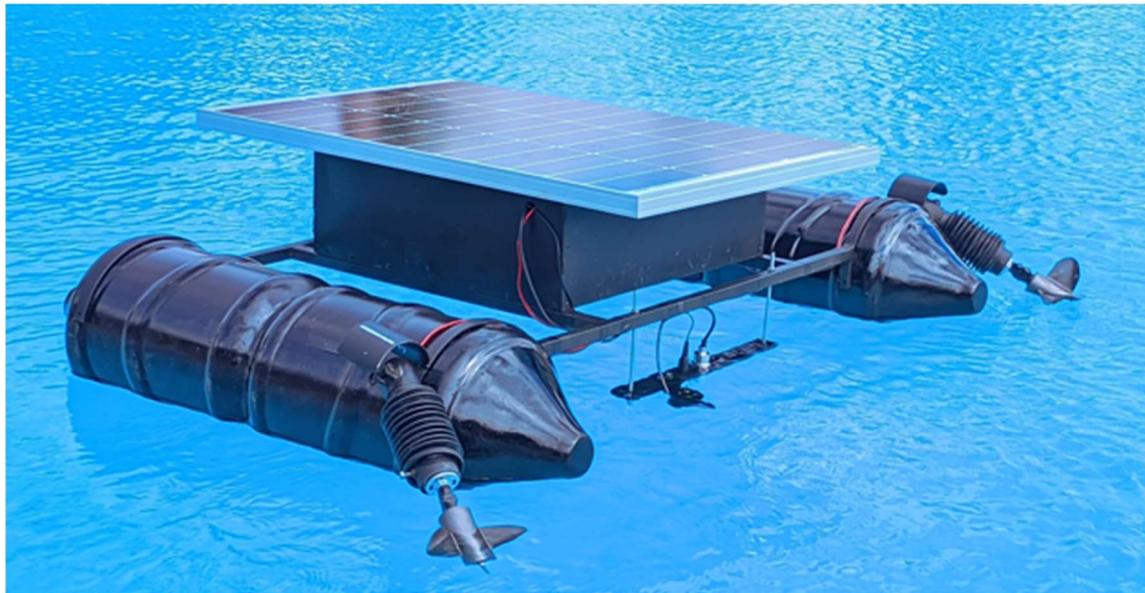


figure 2 Drone flottante – concepteur : Auteur

- ❖ Des sondes piézométriques et des micro-moulinets d'hydrologie, acquis grâce à l'appui du projet SAFE-M, permettent à l'Université de l'Itasy — à travers la mention Génie de l'Eau et de l'Environnement — de les utiliser dans le cadre des travaux pratiques des étudiants. Les sondes mesurent les niveaux piézométriques sur divers puits et points d'eau répartis dans la région, afin d'élaborer une cartographie fine de la nappe phréatique. Quant aux micro-moulinets, ils servent à évaluer les vitesses d'écoulement dans les cours d'eau, fournissant ainsi des données essentielles pour caractériser les débits. L'ensemble de ces mesures contribue à une meilleure compréhension du fonctionnement hydrogéologique régional et à la validation croisée des observations lacustres et climatiques.



figure 3 Mesure piézométrique manuelle d'un puit effectuée par les étudiants de la mention Génie de l'eau de l'UDI

Les données issues des capteurs sont transmises automatiquement via réseau 4G, à une fréquence journalière ou horaire selon le capteur. Elles sont centralisées sur un serveur dédié, utilisant un Système de Gestion de Base de Données (SGBD) relationnel, avec des protocoles sécurisés de stockage et d'archivage. On obtient ainsi, des données sur la mesure spatio-temporelle de chaque paramètre observé. Ces mesures seront représentées sous forme de diagrammes ou carte en fonction du temps et seront mises à disposition auprès des scientifiques, des étudiants ou des institutions publiques via une interface développée au sein de l'Observatoire. Les diagrammes seront disponibles à tout moment de l'année et ils seront également accessibles, quelle que soit leur date d'apparition. Les scientifiques trouvent un intérêt particulier à ce jeu de données très intéressant, il leur permet d'étudier l'évolution de certains paramètres, des paramètres qu'ils peuvent choisir et identifier directement au niveau du système d'informations. Grâce à ces données, l'Observatoire pourra alerter sur des situations de crise, favoriser des actions de restauration et en suivre l'efficacité. De plus, l'Observatoire disposera d'un outil de prédiction par rapport aux comportements des variables hydro-climatiques. Ainsi, le terme d'outil d'aide à la décision tient toute sa place puisqu'il apportera des informations utiles aux gestionnaires, leur donnant les moyens de prendre des décisions stratégiques pertinentes.

Le système pourra, dans les années à venir, s'engager à aborder le principal enjeu lié à la surveillance et à l'étude de cas similaires

2.2 Analyse des erreurs de mesure des capteurs et leurs traitements statistiques

2.2.1 Les erreurs de mesures

❖ Erreur aléatoire

Elle inclut les principales sources d'erreurs, notamment :

- ✓ le seuil de mesure correspondant à la plus petite valeur mesurable ;
- ✓ la résolution, soit la plus petite variation mesurable ;
- ✓ l'hystérésis ;
- ✓ les parasites ;
- ✓ les influences du milieu sur le capteur, comme celles provoquées par les variations de température sur un capteur de pression.

Lors de mesures répétées nous obtenons généralement une dispersion des résultats ; si les erreurs de mesure sont aléatoires un traitement statistique permet de connaître la valeur la plus probable de la grandeur mesurée et de fixer les limites de l'incertitude [9].

Lorsque la mesure d'une même valeur a été répétée n fois en donnant les résultats : M_1, M_2, \dots, M_n , la valeur moyenne \bar{M} est par définition :

$$\bar{M} = \sum_{i=1}^n \frac{M_i}{n} \quad (1)$$

L'erreur aléatoire E_a est la différence entre le résultat d'un mesurage M_i et cette moyenne \bar{M} lorsque n tend vers l'infini et que les mesures sont obtenues dans des conditions de répétabilité [9] :

$$E_a = M_i - \bar{M} \quad (2)$$

Lorsque les erreurs accidentelles sur les différentes mesures sont indépendantes, la probabilité d'apparition de différents résultats satisfait habituellement la loi de Gauss.

Lorsque cette loi est satisfaite, la probabilité $P(M_a, M_b)$ d'obtenir comme résultat d'une mesure une valeur comprise entre deux valeurs M_a et M_b peut s'écrire :

$$P(M_a, M_b) = \int_{M_b}^{M_a} P(M) dM \quad (3)$$

où $P(M)$ est la densité de probabilité d'obtenir la valeur M .

Dans le cas de la loi de Gauss cela donne :

$$P(M) = \frac{\exp\left(-\frac{(M - \bar{M})^2}{2\sigma^2}\right)}{\sigma\sqrt{2\pi}} \quad (4)$$

Une indication de la dispersion de ces résultats est donnée par l'écart type σ :

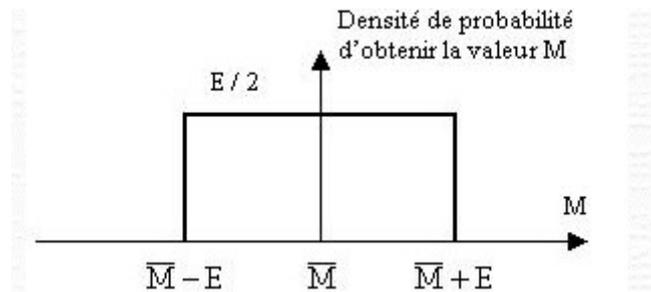
$$\sigma^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} (M - \bar{M})^2 P(M) dM \quad (5)$$

\bar{M} est la valeur de M la plus probable

Lorsque nous disposons d'un nombre « n » de mesures :

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (M - \bar{M})^2}{n - 1}} \quad (6)$$

Il est fréquent que le fabricant d'un capteur donne sa précision sans donner la loi de distribution des erreurs. Par exemple, il indique que son capteur fournit la valeur à mesurer (le mesurande M) à $\pm E$. Dans ce cas, il faut se placer dans le cas le plus défavorable et considérer que la densité de probabilité est uniforme dans l'intervalle $[-E ; +E]$ comme représenté ci-dessous.



❖ Densité de probabilité d'obtenir la valeur M

Dans ce cas nous avons :

Probabilité $\{-E < M < +E\} = 1 = \text{aire du rectangle}$. Donc :

$$\sigma^2 = \int_{-E}^{+E} \frac{1}{2E} M dM \quad (7)$$

Soit, après intégration :

$$\sigma^2 = \frac{E^2}{3} \quad (8)$$

D'où :

$$\sigma = \frac{E}{\sqrt{3}} \quad (9)$$

❖ Erreur systématique

L'erreur systématique se superpose aux erreurs aléatoires. Elle est provoquée par un mauvais réglage ou un mauvais étalonnage. Elle peut également être induite par la présence du capteur qui modifie la valeur du mesurande [9]. Elle devient significative lorsque les instruments sont mal utilisés.

L'erreur systématique E_s est la différence entre la moyenne \bar{M} lorsque n tend vers l'infini et que les mesures sont obtenues dans des conditions de répétabilité et une valeur **vraie** du mesurande M_0 [9]:

$$E_s = \bar{M} - M_0 \quad (10)$$

Cette définition utilise sciemment l'expression « une valeur vraie du mesurande » et non « une vraie valeur du mesurande » puisque la valeur vraie du mesurande n'est pas connue (sauf si nous considérons que le mesurande est un étalon primaire du système SI).

2.2.2 Réponses des capteurs

La réponse des capteurs n'est pas instantanée. Lorsque la grandeur à mesurer varie, la valeur mesurée suit avec un certain retard [9].

❖ Réponse à un échelon des systèmes du premier ordre

Nous appelons la grandeur à mesurer le mesurande. Admettons, pour simplifier, que ce mesurande passe instantanément de la valeur 0 à la valeur m_0 au temps $t = 0$:

$$m = 0 \text{ pour } t < 0$$

$$m = m_0 \text{ pour } t \geq 0$$

L'équation différentielle d'un système du premier ordre est :

$$A \frac{ds}{dt} + Bs = m_0 \quad (11)$$

Supposons qu'au temps $t = 0$, $s = 0$. La solution de l'équation différentielle est :

$$s = s_0 \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\theta}\right) \right] \text{ avec } \theta = \frac{A}{B} \quad (12)$$

Prenons le cas concret d'un capteur de température. Ce capteur a une capacité calorifique C , une masse m , un coefficient d'échange surfacique par conduction h et une surface S en contact avec le milieu à mesurer. Soit T la température de ce milieu qui varie en fonction du temps et T_c la température du capteur à l'instant t ; l'équation classique de transfert de chaleur est :

$$\frac{dT_c}{dt} = \frac{hS}{mC} (T - T_c) \quad (13)$$

Nous posons :

$$\theta = \frac{mC}{hS} \quad (14)$$

D'où :

$$\frac{dT_c}{dt} = \frac{1}{\theta} (T - T_c) \quad (15)$$

Après intégration :

$$T_c = T \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\theta}\right) \right) \quad (16)$$

❖ Réponse à une rampe des systèmes du premier ordre

Reprenons l'exemple du capteur de température présenté précédemment. À l'instant $t = 0$, $T = T_0$, et ensuite le mesurande varie linéairement en fonction du temps : $T = \mu t + T_0$ la température mesurée est alors de :

$$T_c = \mu t + T_0 - \mu\theta \left[1 + \exp\left(-\frac{t}{\theta}\right) \right] \quad (17)$$

La température mesurée tend vers une asymptote d'équation :

$$Y = \mu t + T_0 \quad (18)$$

Elles se confondent vers $t = 5\theta$. L'erreur entre la température réelle et celle mesurée est alors de $\square\square$.

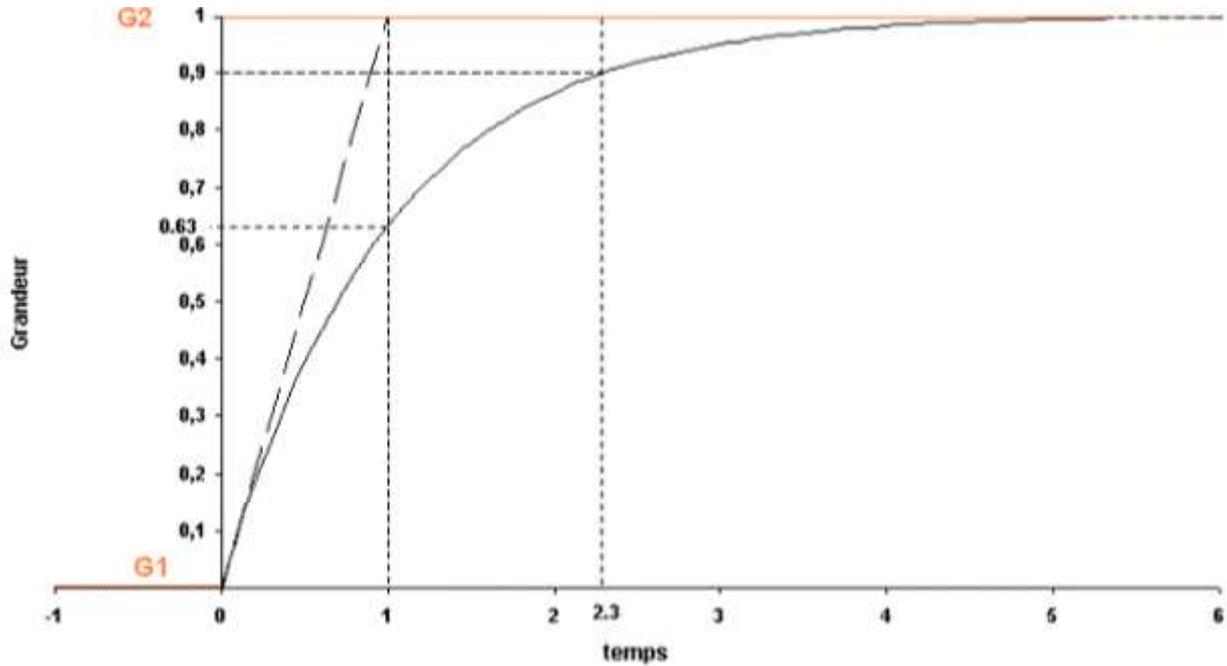


figure 4 Réponse à un échelon d'un système du premier ordre

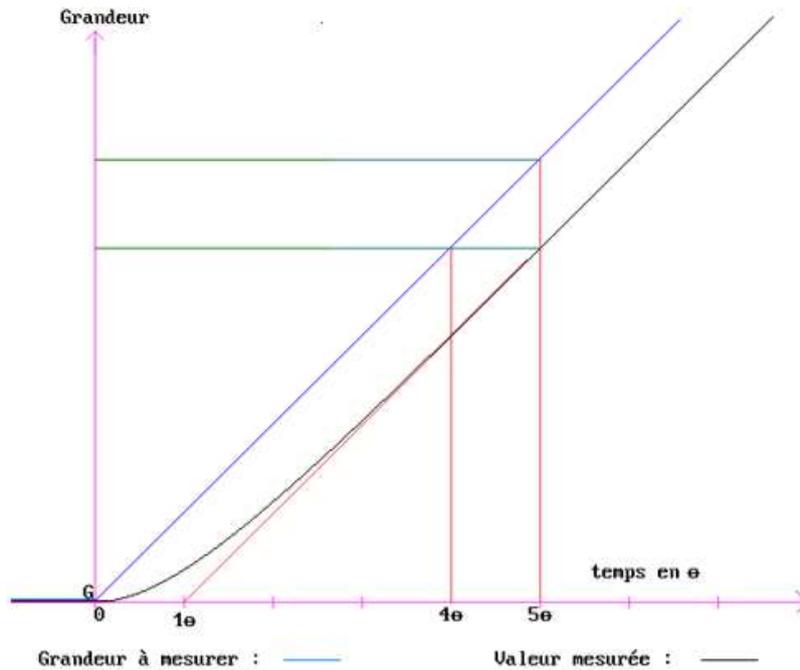


figure 5 Réponse à une rampe d'un système du premier ordre

❖ Réponse à un échelon des systèmes du second ordre

Le mesurande passe instantanément de la valeur 0 à la valeur m_0 au temps $t = 0$:

$$m = 0 \text{ pour } t < 0$$

$$m = m_0 \text{ pour } t \geq 0$$

Cet échelon est appliqué à un système du second ordre qui a pour équation :

$$A \frac{d^2s}{dt^2} + B \frac{ds}{dt} + Cs = m_0 \quad (19)$$

Pour simplifier, considérons que les conditions initiales à $t = 0$ sont :

$$s = 0 \text{ et } \frac{ds}{dt} = 0 \quad (20)$$

En régime permanent nous avons :

$$s = \frac{m_0}{C} \quad (21)$$

Posons :

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = \sqrt{\frac{C}{A}} \quad (22)$$

la pulsation propre et

$$\zeta = \frac{B}{\sqrt{CA}} \quad (23)$$

le coefficient d'amortissement. Suivant la valeur de ζ nous obtenons trois solutions :

1) $\zeta < 1$ Faible amortissement. Le regime transitoire est une oscillation amortie de la forme :

$$s(t) = s_0 \left[1 - \frac{\exp(-\zeta \omega_0 t)}{R} \sin(R \omega_0 t + \psi) \right] \quad (24)$$

où:

$$R = \sqrt{|1 - \zeta^2|} \text{ et } \psi = \arcsin(R) \quad (25)$$

2) $\zeta = 1$ Amortisseur critique. La réponse du système a pour équation :

$$s(t) = s_0 [1 - (1 + \omega_0 t) \exp(-\omega_0 t)] \quad (26)$$

3) $\zeta > 1$ Amortissement important. La réponse du système devient :

$$s(t) = s_0 \left[\frac{R - \zeta}{2R} (\exp((R - \zeta) \omega_0 t) - \exp(-(R + \zeta) \omega_0 t)) + 1 \right] \quad (27)$$

Le coefficient d'amortissement permettant d'obtenir un temps de réponse optimal est compris entre 0,6 et 0,7.

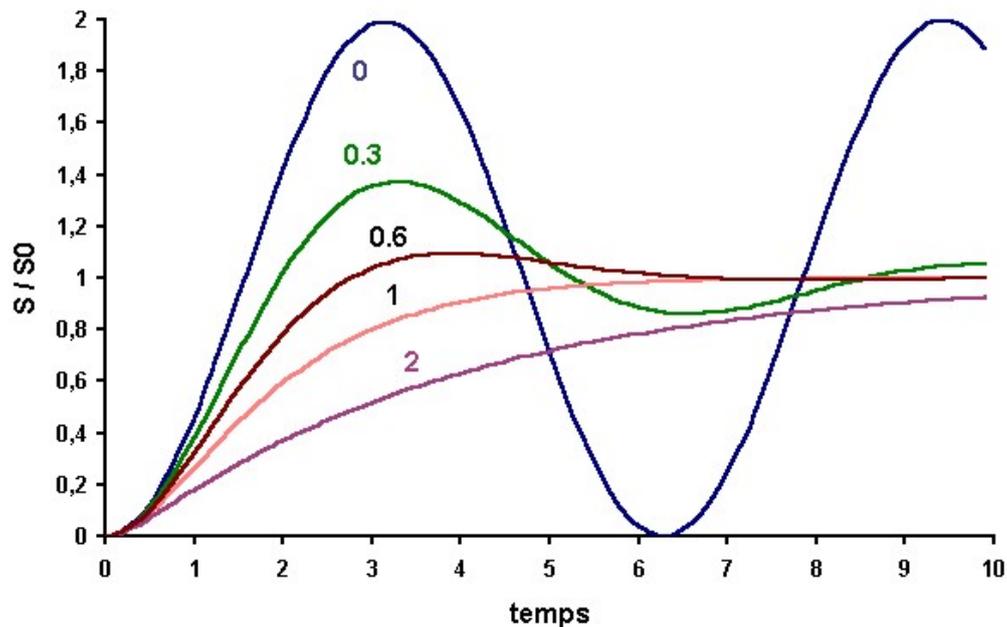


figure 6 Réponse à un échelon d'un système du second ordre

2.3 Approche hybride : télédétection et réseau de capteurs

2.3.1 Météo : ECMWF – ERA5-LAND

Afin d'établir une base solide pour notre système, nous avons recours à une source de données fiable et largement reconnue dans la communauté scientifique. La méthodologie que nous avons choisie s'appuie sur le jeu de données ERA5-Land.

ERA5-Land est un jeu de données météorologiques et climatiques de réanalyse à haute résolution spatiale, produit par le Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme (ECMWF) dans le cadre du service Copernicus Climate Change Service (C3S).

Il fournit une reconstruction cohérente de l'évolution des variables météorologiques et hydrologiques sur les surfaces continentales, depuis 1950 jusqu'à aujourd'hui, avec une mise à jour quasi en temps réel.

Les principales caractéristiques techniques incluent :

- Domaine couvert : Surface continentale mondiale (hors océans) ;
- Période temporelle : 1950 à aujourd'hui (mise à jour régulière) ;
- Résolution spatiale : ~9 km (0.1° x 0.1°) ;
- Pas temporel : horaire ;
- Format des données : NetCDF, GRIB (formats standards scientifiques et compatibles avec outils SIG, Python, R, MATLAB).

Variables disponibles :

- Température de l'air à 2 m ;
- Température du sol (à différentes profondeurs) ;
- Précipitations (totales, neige) ;

- Humidité relative et spécifique ;
- Rayonnement solaire incident (court et long terme) ;
- Vent à 10 m (u, v) ;
- Évapotranspiration ;
- Contenu en eau du sol.

ERA5-Land est dérivé du modèle de réanalyse ERA5. Il combine l'assimilation de données provenant de multiples sources, telles que les satellites, les stations météorologiques, les radars et les radiosondages, avec l'utilisation du modèle de surface terrestre HTESSEL (Hydrology Tiled ECMWF Scheme for Surface Exchanges over Land). Cette approche est ensuite affinée par un rééchantillonnage à haute résolution spatiale, garantissant une meilleure représentation des phénomènes locaux. Cela garantit une meilleure cohérence spatiale et temporelle des données, y compris dans les zones peu couvertes par des stations météorologiques.

L'intégration d'ERA5-Land dans notre système de supervision repose sur un enchaînement cohérent d'étapes allant de l'acquisition des données jusqu'à leur visualisation. L'extraction est assurée par un script Python utilisant la CDS API (Climate Data Store Application Programming Interface). Son exécution, planifiée par des tâches CRON, assure la mise à jour régulière et fiable des bases locales.

```
1 import cdsapi
2 import xarray as xr
3 import pandas as pd
4 import os
5
6 bounding_box = [-19.1, 46.75, -19.0, 46.85]
7
8 c = cdsapi.Client()
9
10 year = '2020'
11 months = [f'{month:02}' for month in range(1, 13)]
12 days = [f'{day:02}' for day in range(1, 32)]
13 times = [f'{hour:02}:00' for hour in range(24)]
14
15 filename = 'era5_land_itasy_2020.nc'
16
17 c.retrieve(
18     'reanalysis-era5-land-monthly-means',
19     {
20         'product_type': 'reanalysis_monthly_means',
21         'variable': '2m_temperature',
22         'year': year,
23         'month': months,
24         'time': '00:00',
25         'area': bounding_box,
26         'format': 'netcdf',
27     },
28     filename)
29
30 if os.path.exists(filename):
31     ds = xr.open_dataset(filename)
32
33     ds['t2m_celsius'] = ds['t2m'] - 273.15
34
35     monthly_mean_temp = ds['t2m_celsius'].mean(dim=['longitude', 'latitude'])
```

figure 7 Aperçu du code pour le téléchargement des données

L'API CDS est une interface qui permet de télécharger des données climatiques en spécifiant différents paramètres tels que les variables, la période et la zone géographique. Le traitement se fait ensuite localement. Les données des stations locales seront utilisées pour "caler" (ou valider) les modèles météorologiques. Cette approche permet de corriger les éventuels écarts ou biais des données de réanalyse, assurant ainsi une meilleure fiabilité du système.

2.3.2 Hydrologie : Sentinel-2

Pour la partie de notre étude consacrée à l'analyse des plans d'eau, nous nous appuyons sur les données de la mission Sentinel-2, dont la haute résolution spatiale et la fréquence revisitée permettent une observation précise des variations de surface et de qualité des plans d'eau au fil du temps. Sentinel-2 est une mission d'imagerie satellitaire optique de la constellation Copernicus, gérée par l'Agence spatiale européenne (ESA). Elle se compose de deux satellites jumeaux, Sentinel-2A et Sentinel-2B, qui fournissent des images de la surface terrestre à haute résolution spatiale, conçues pour la surveillance de la végétation, des sols, de l'eau et de la cartographie des zones côtières.

Les satellites Sentinel-2 capturent des données en 13 bandes spectrales, du visible à l'infrarouge à ondes courtes, permettant une grande variété d'applications d'analyse. Grâce à sa capacité d'imagerie multispectrale, Sentinel-2 est un outil essentiel pour le suivi environnemental à l'échelle mondiale.

La mission se distingue par ses caractéristiques clés, qui incluent notamment :

- Domaine couvert : Surface terrestre mondiale (zones côtières incluses) ;
- Période temporelle : Depuis 2015 jusqu'à aujourd'hui ;
- Résolution spatiale : Élevée et variable : 10 m pour les bandes du visible (rouge, vert, bleu, proche infrarouge), 20 m pour les bandes infrarouges (red edge, infrarouge à ondes courtes) et 60 m pour les bandes de correction atmosphérique ;
- Pas temporel : Revisite tous les 5 jours, ou tous les 2-3 jours dans certaines régions, grâce aux deux satellites ;
- Format des données : TIFF (GeoTIFF) avec des métadonnées au format XML ;
- Variables disponibles :
 - Bandes spectrales : Réflectance de la surface pour les bandes rouge, vert, bleu, proche infrarouge et plusieurs bandes spécialisées (red edge).
 - Indices dérivés :
 - NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) pour la biomasse et la santé de la végétation.
 - NDWI (Normalized Difference Water Index) pour cartographier les plans d'eau.

L'intégration des données Sentinel-2 dans notre système de supervision repose sur un flux de travail directement géré par un script Python. Contrairement à une approche de téléchargement et de stockage local, l'extraction et l'analyse des données se font à la volée sur les serveurs de Google Earth Engine (GEE). Cela garantit une accessibilité immédiate aux images et permet de réaliser des calculs complexes, comme le calcul du NDWI et de la surface du lac, sans avoir à gérer des volumes massifs de données brutes sur nos infrastructures locales.

Par contre, Les capteurs fournissent des mesures directes de variables clés comme la température de l'eau, la profondeur, la conductivité ou la turbidité. Ces données sont utilisées pour vérifier si les simulations des modèles correspondent à la réalité. Sans ces points de validation, le modèle ne serait qu'une estimation théorique.

2.4 Variables hydro-climatique

2.4.1 Température de l'air

La température de l'air est un paramètre météorologique fondamental qui influence directement et significativement l'écosystème lacustre. Une variation de la température de l'air affecte la température de l'eau, ce qui modifie la solubilité des gaz notamment l'oxygène dissous. De plus, elle joue un rôle crucial dans les processus d'évaporation de surface, une des principales sources de perte d'eau pour un lac. Un suivi continu de cette variable permet de mieux comprendre les variations thermiques du milieu aquatique et d'anticiper les impacts sur la faune et la flore. [11]

2.4.2 Humidité de l'air

L'humidité relative de l'air, exprimée en pourcentage, mesure la quantité de vapeur d'eau présente dans l'atmosphère par rapport à la quantité maximale que l'air pourrait contenir à une température donnée. Ce paramètre est directement lié au taux d'évaporation du lac. Un air sec (faible humidité) favorise une évaporation plus rapide de l'eau, entraînant une diminution du niveau du lac. À l'inverse, un air très humide ralentit ce processus. En combinant les données d'humidité avec celles de la température et du vent, il est possible d'estimer l'évapotranspiration potentielle et de modéliser le bilan hydrique du lac.

L'humidité relative de l'air est définie par le rapport entre la pression de vapeur réelle de l'air (e_a) et la pression de vapeur saturante (e_s) à une température donnée. [12]

$$HR = \frac{e_a}{e_s} \times 100 \quad (28)$$

La valeur de e_s dépend de la température de l'air. On peut l'estimer à l'aide de l'équation de Tetens ou de la formule de Magnus, qui relie la pression de vapeur saturante à la température (T) en degrés Celsius :

$$e_s(T) = 0.6108 \times \exp\left(\frac{17.27 \times T}{T + 237.3}\right) \quad (29)$$

$e_s - e_a$ est le déficit de saturation de la vapeur. Un déficit élevé indique un air sec et un fort potentiel d'évaporation, tandis qu'un faible déficit indique un air humide et un faible potentiel d'évaporation.

2.4.3 Précipitation

Les précipitations constituent généralement la source principale de l'alimentation en eau d'un bassin versant. Mesurées en millimètres, elles sont l'apport le plus important pour le lac et ses affluents. Un suivi précis des précipitations permet d'évaluer les apports en eau, de prévoir les crues ou les périodes de sécheresse, et d'ajuster la gestion des ressources.

2.4.4 Vitesse et direction du vent

La vitesse et la direction du vent influencent fortement l'état d'un lac [13]. Le vent est un facteur clé de l'agitation de la surface de l'eau, ce qui favorise l'échange gazeux avec l'atmosphère, notamment la dissolution de l'oxygène. La loi de Fick, dans une forme simplifiée, décrit le flux de gaz (F) à travers une interface :

$$F = k_L(C_{atm} - C_{eau}) \quad (30)$$

- k_L est le coefficient de transfert gazeux (ou vitesse de piston).
- C_{atm} est la concentration du gaz dans l'atmosphère (ex. : oxygène dissous).
- C_{eau} est la concentration du gaz dans l'eau.

Le coefficient de transfert gazeux (k_L) est une fonction de la vitesse du vent. Plus le vent est fort, plus k_L est élevé, ce qui signifie que l'oxygène se dissout plus rapidement dans l'eau. Des modèles empiriques relient k_L à la vitesse du vent mesurée à 10 mètres du sol tel que :

$$k_L = a \times u_{10}^b \quad (31)$$

Les coefficients a et b sont déterminés empiriquement. Cette relation montre que l'agitation de surface causée par le vent a un impact direct et non linéaire sur l'oxygénation du lac.

De plus, un vent fort peut également créer des vagues qui érodent les berges et mélangent les différentes couches d'eau (brassage thermique). De plus, le vent accélère le taux d'évaporation, contribuant aux pertes en eau.

La direction et la vitesse du vent sont les principaux moteurs du brassage thermique des lacs. Le vent exerce une force de cisaillement à la surface, créant des courants qui mélangent les couches d'eau. La force du vent est souvent modélisée comme une contrainte de cisaillement τ_{ω}

$$\tau_{\omega} = \rho_{air} C_d u_{10}^2 \quad (32)$$

- ρ_{air} est la densité de l'air.
- C_d est le coefficient de traînée, une valeur sans unité qui dépend de la rugosité de la surface.
- u_{10} est la vitesse du vent à 10 m.

Cette force de cisaillement est responsable de la déstabilisation des couches de densité thermique dans le lac. Pendant les périodes froides, un vent fort peut briser la stratification thermique et mélanger l'eau de surface, riche en oxygène, avec l'eau de fond. Ce processus, appelé brassage automnal, est vital pour le renouvellement de l'oxygène dans les couches profondes et la libération de nutriments stockés au fond du lac.

2.4.5 Pression atmosphérique

La pression atmosphérique, mesurée en hectopascals (hPa), influence le point de saturation des gaz dans l'eau. Une pression plus faible réduit la capacité de l'eau à retenir l'oxygène dissous. Bien que son impact direct sur le lac soit souvent moins évident que celui des autres variables, la pression atmosphérique est un paramètre fondamental pour la modélisation de la qualité de l'eau et pour l'interprétation des données de saturation en oxygène.

2.4.6 Rayonnement solaire global

Afin de mesurer cette variable, un pyranomètre est utilisé. Le pyranomètre mesure l'irradiance, c'est-à-dire la densité de flux d'énergie électromagnétique, exprimée en watts par mètre carré (W/m²). Cette mesure englobe le rayonnement solaire qui arrive directement du soleil et celui qui est diffusé par l'atmosphère. L'appareil capte ce rayonnement dans la gamme de longueurs d'onde du spectre solaire (principalement de 300 à 3 000 nm).

La relation entre le rayonnement solaire global et d'autres paramètres hydro-climatiques peut être exprimée par des formules de modélisation.

L'évapotranspiration potentielle (ET_0) peut être estimée en utilisant des méthodes comme l'équation de Penman-Monteith [14], qui intègre le rayonnement net (R_n), la température, l'humidité et la vitesse du vent :

$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)} \quad (33)$$

Où :

- R_n est le rayonnement net (calculé à partir du rayonnement solaire global) ;
- Δ est la pente de la courbe de saturation de la pression de vapeur ;
- G est le flux de chaleur du sol ;
- γ est la constante psychrométrique ;
- T est la température de l'air ;

- u_2 est la vitesse du vent ;
- e_s est la pression de vapeur saturante ;
- e_a est la pression de vapeur réelle.

Le rayonnement net (R_n) est une composante essentielle de cette équation et est calculé à partir du rayonnement solaire global (R_s), du rayonnement de grande longueur d'onde et de l'albédo de la surface de l'eau. Le pyranomètre fournit la valeur de R_s , qui est fondamentale pour ces calculs.

La formule couramment utilisée pour calculer le rayonnement de grande longueur d'onde net est la suivante :

$$R_L = \sigma(\epsilon_{eau}T_{eau}^4 - \epsilon_{air}T_{air}^4) \quad (34)$$

- σ est la constante de Stefan-Boltzmann, égale à $5.67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$;
- T_{eau} est la température de la surface de l'eau en kelvins (K) ;
- T_{air} est la température de l'air en kelvins (K) ;
- ϵ_{eau} est l'émissivité de l'eau, généralement proche de 0.97 ;
- ϵ_{air} est l'émissivité de l'atmosphère, souvent modélisée comme une fonction de l'humidité et de la couverture nuageuse.

L'albédo est une valeur exprimant la fraction de rayonnement réfléchi ou diffus par le plan d'eau en question. Elle varie en fonction de la latitude et l'époque de l'année. Une mesure de cette valeur a été étudiée par Eddi, 1980 [33] et résumée dans le tableau suivant :

Latitude	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juill.	Août	Sept.	Oct.	Nov	Dec.
80N			0.33	0.14	0.10	0.09	0.08	0.08	0.12			
70N		0.41	0.15	0.10	0.08	0.07	0.07	0.09	0.11	0.25		
60N	0.28	0.12	0.09	0.07	0.07	0.07	0.06	0.07	0.07	0.10	0.16	0.44
50N	0.11	0.1	0.08	0.07	0.06	0.06	0.06	0.07	0.07	0.08	0.11	0.12
40N	0.10	0.09	0.07	0.07	0.06	0.06	0.06	0.06	0.07	0.08	0.1	0.11
30N	0.09	0.07	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.07	0.08	0.09
20N	0.07	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.07	0.07
10N	0.07	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.07
0	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
10S	0.06	0.06	0.06	0.06	0.07	0.07	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
20S	0.06	0.06	0.06	0.06	0.07	0.07	0.07	0.07	0.06	0.06	0.06	0.06
30S	0.06	0.06	0.06	0.07	0.08	0.09	0.08	0.07	0.07	0.06	0.06	0.06
40S	0.06	0.06	0.07	0.08	0.09	0.11	0.10	0.08	0.07	0.07	0.06	0.06
50S	0.06	0.07	0.07	0.08	0.10	0.13	0.11	0.08	0.08	0.07	0.06	0.06
60S	0.06	0.07	0.08	0.11	0.13		0.27	0.07	0.08	0.07	0.06	0.06

Tableau 1 Valeur de l'albédo en fonction de la latitude et du mois de l'année [15]

Un autre aspect technique important est l'effet du rayonnement solaire sur l'activité photosynthétique. La photosynthèse est un processus qui utilise l'énergie lumineuse pour convertir le dioxyde de carbone et l'eau en glucose et en oxygène. La quantité d'oxygène dissous (O_2) dans le lac dépend donc directement de l'intensité lumineuse [16]. La relation peut être complexe, mais elle est généralement modélisée comme suit :

$$Photosynthese_{nette} = Photosynthese_{brute} - respiration \quad (35)$$

La photosynthèse brute est une fonction de la lumière incidente. Par conséquent, une mesure du rayonnement solaire global permet de mieux comprendre les fluctuations journalières et saisonnières de la concentration en oxygène dissous dans le lac.

La mesure du rayonnement solaire fournit une donnée technique et quantitative cruciale qui n'est pas seulement descriptive, mais qui sert de variable d'entrée dans des modèles mathématiques complexes pour estimer des processus clés comme l'évapotranspiration et la production d'oxygène dans l'écosystème aquatique.

2.5 Paramètres physico-chimiques

L'hydrologie des écosystèmes lacustres comporte de nombreux descripteurs dont beaucoup sont reliés entre eux par des relations de cause à effet. Les paramètres fondamentaux qui caractérisent un lac doivent être mesurés régulièrement *in situ* (à l'aide de capteurs *in situ*) puisque l'appréciation de la qualité des eaux de surface se base sur la mesure de paramètres physico-chimiques, indicateurs d'une plus ou moins bonne qualité de l'eau. Les paramètres que nous allons mesurer afin de suivre l'évolution du lac Itasy sont décrits dans cette section. Les fréquences d'échantillonnage varient selon les capteurs : certaines mesures sont faites toutes les heures. Les données brutes sont enregistrées au format JSON, puis traitées pour la génération de rapports.

2.5.1 Oxygène dissous

Lorsque l'on parle de cette variable on fait exclusivement référence à l'oxygène moléculaire (O_2). Les apports en dioxygène dans les eaux sont : la dissolution du dioxygène de l'air et la photosynthèse des algues vivant dans l'eau.

L'oxygène est un indicateur qui renseigne quant à l'aptitude du milieu à maintenir la vie ou à observer un excédent momentané de pollution à forte « Demande Biochimique en Oxygène », pour l'oxydation de matières organiques par exemple. Sont concernées toutes les eaux qui sont soumises à des apports nutritifs ou organiques d'origine anthropique (agriculture/aquaculture) ou situées dans des zones d'accumulation de matières organiques. Il s'agit donc d'un paramètre représentatif de la qualité de l'eau car il intervient dans la plupart des processus biologiques qui permettent la vie. Cependant, en son absence ou en dessous de certaines concentrations, des conséquences pouvant aller jusqu'à la mort des espèces vivantes sont observées (Figure 8).

L'oxygène dissous est donc un paramètre vital qui gouverne la majorité des processus biologiques des écosystèmes aquatiques.

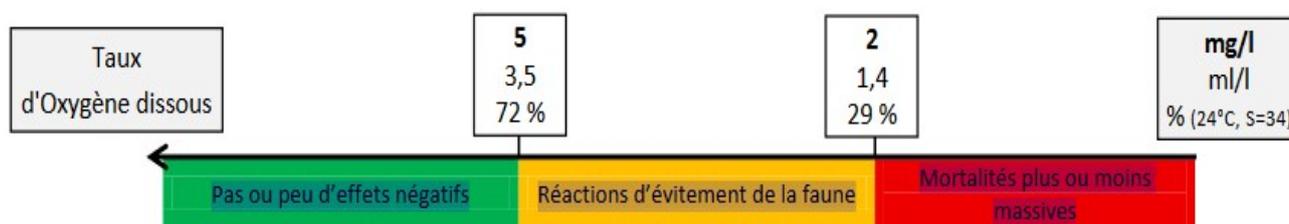


figure 8 Effets observés sur les êtres vivants

Les concentrations en oxygène dissous constituent, avec les valeurs de pH, l'un des plus importants paramètres de qualité des eaux pour la vie aquatique. L'oxygène dissous dans les eaux de surface provient essentiellement de l'atmosphère et de l'activité photosynthétique des algues et des plantes aquatiques [17].

Globalement, plus la concentration en oxygène dissous (OD) est proche de la saturation, plus l'aptitude du lac à absorber la pollution est grande [18] :

- Une valeur inférieure à 1 mg d'O₂ par litre indique un état proche de l'anaérobie. Cet état se produit lorsque les processus d'oxydation des déchets minéraux, de la matière organique et des nutriments consomment plus d'oxygène que celui disponible. Une faible teneur en oxygène dissous provoque une augmentation de la solubilité des éléments toxiques qui se libèrent des sédiments ;
- Une valeur de 1 à 2 mg d'O₂ par litre indique un lac fortement pollué mais de manière réversible ;
- Une teneur de 4 à 6 mg d'O₂ par litre caractérise une eau de bonne qualité ;
- Des teneurs supérieures à la teneur naturelle de saturation en oxygène indiquent une eutrophisation du milieu se traduisant par une activité photosynthétique intense.

Les espèces de poissons sensibles peuvent être perturbées par une teneur en oxygène inférieure à 4 mg/l.

La concentration en oxygène dissous peut être exprimée en mg d'O₂ par litre ou en % de saturation en oxygène. Comme l'illustre le tableau ci-dessous, la relation entre ces 2 valeurs est fonction de la température.

Température (°C)	Solubilité (mg O ₂ /l)
0	14,16
5	12,37
10	10,92
15	9,76
20	8,84
25	8,11

Tableau 2 Solubilité de l'oxygène dans l'eau en fonction de la température

À une température de l'ordre de 15°C, l'objectif de qualité de 50% de saturation en oxygène correspond à une concentration de 5 mg d'O₂/litre: c'est la valeur normale de l'oxygène dissous [19].

Le référentiel du tableau 1 a été établi afin d'évaluer l'état physico-chimique de la masse d'eau au regard de l'oxygène dissous.

	Très bon	Bon	Moyen	Médiocre	Mauvais
Concentration en oxygène dissous (mg/l)	> 5	3 – 5	2 – 3	1 – 2	< 1

Tableau 3 Valeurs de référence

La concentration en oxygène dissous varie de manière journalière et saisonnière car elle dépend de nombreux facteurs tels que la pression partielle en oxygène de l'atmosphère, la température de l'eau, la salinité, la pénétration de la lumière, l'agitation de l'eau et la disponibilité en nutriments. Cette concentration en oxygène dissous est également fonction de la vitesse d'appauvrissement du milieu en oxygène par l'activité des organismes aquatiques et les processus d'oxydation et de décomposition de la matière organique présente dans l'eau [20].

2.5.2 Salinité

La salinité est l'une des caractéristiques physico-chimiques de l'eau. Techniquement, la salinité mesure la concentration d'une eau en sels secs dissous (chlorure de sodium, chlorure de magnésium, sulfate de magnésium, etc.) au travers de la conductivité électrique de cette eau.

Les sels dissous modifient certaines propriétés de l'eau, en premier lieu sa capacité de dissolution, sa densité, mais aussi sa compressibilité, son point de congélation et d'ébullition, sa dureté ainsi que sa viscosité ou sa corrosivité, et très légèrement sa capacité à transporter les sons et la lumière.

Certaines sont essentiellement déterminées par la quantité de sel dans l'eau telle que la conductivité et la pression osmotique [21]. Le suivi de la quantité de sels dissous dans l'eau est donc important puisque la variation de plusieurs paramètres déterminant la qualité de l'eau en dépend.

La salinité de l'eau pousse le poisson à l'osmorégulation pour que la concentration de sel dans les fluides du corps reste constante. L'osmorégulation demande une consommation d'énergie et son coût énergétique dépend de la différence entre la salinité de l'eau et la salinité des fluides du corps.

La connaissance du contenu en sels dissous est donc importante dans la mesure où chaque organisme aquatique a des exigences propres en ce qui concerne ce paramètre. Les espèces aquatiques ne supportent généralement pas des variations importantes en sels dissous qui peuvent être observées par exemple en cas de déversements d'eaux usées [19].

Ainsi, le suivi de la salinité de l'eau est indispensable pour évaluer l'état des organismes aquatiques ; de plus l'excès de la teneur en sel est l'un des soucis principaux avec l'eau utilisée pour l'irrigation puisqu'il affectera négativement le rendement des récoltes, provoquera une dégradation des sols et une pollution des eaux souterraines. Or, la salinisation des masses d'eau souterraine est l'une des principales causes de dégradation de la qualité de l'eau dans le monde [19].

Nous distinguons différents types d'eau en fonction de la teneur en sels dissous [20] :

- Eau douce : L'eau est dite douce lorsque sa salinité est inférieure à 1 g/L. On retrouve majoritairement les eaux douces sur les continents. Nous estimons qu'uniquement 2,5% de l'eau retrouvée sur Terre est douce et donc susceptible de servir à notre consommation.
- Eau saumâtre : L'eau saumâtre forme la transition entre les zones d'eau douce et celles d'eau salée. La salinité est comprise entre 1 et 10 g/L. On retrouve les eaux saumâtres principalement à l'embouchure des fleuves, dans les estuaires et les deltas.
- Eau salée : L'eau des mers et des océans possède une salinité supérieure à celle de l'eau douce. Toutes les eaux dont la salinité dépasse 10 g/L sont qualifiées de salées. L'eau salée représente 97,5% de l'hydrosphère terrestre. Parmi les nombreux types de sel retrouvés dans l'eau de mer, le chlorure de sodium (NaCl) est le plus abondant.

Des valeurs stables de la salinité peuvent être maintenues essentiellement par le renouvellement de l'eau, ou par l'addition d'eau douce pour compenser l'augmentation de la salinité due à l'évaporation.

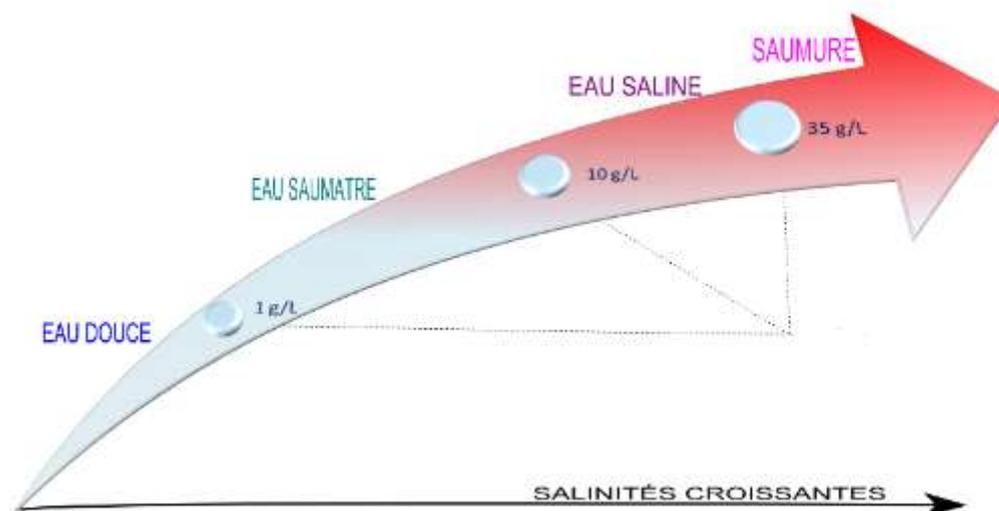


figure 9 Gamme de concentration et terminologie

2.5.3 Ph

Le pH (potentiel Hydrogène) mesure la concentration en ions H^+ de l'eau. Il traduit ainsi la balance entre acide et base sur une échelle de 0 (très acide) à 14 (très alcalin), la valeur médiane 7 étant le pH de neutralité. Ce paramètre caractérise un grand nombre d'équilibre physico-chimique et dépend de facteurs multiples, dont l'origine de l'eau.

Dans de nombreux domaines tels que la médecine, l'industrie agroalimentaire, l'environnement, la connaissance du pH apporte des informations très utiles. Les changements des valeurs normales du pH sont utilisés comme indicateurs des variations qui peuvent survenir dans un système. De plus, le pH a une influence directe sur les conditions de l'environnement. Par exemple, le pH peut être augmenté par l'activité photosynthétique (élevage extensif) et peut diminuer lors d'une trop faible oxygénation (élevage intensif) et en conséquence, une accumulation de CO_2 se produit. En même temps, le pH influence la toxicité de l'ammoniaque et des nitrites. Le paramètre pH est donc un indicateur général du milieu aquatique.

Le pH influence fortement la diversité biologique des lacs. En effet, la majorité des organismes aquatiques ont besoin d'un pH voisin de la neutralité (6-9) afin de survivre [22]. Des variations importantes de pH peuvent donc compromettre certaines de leurs fonctions essentielles telles que la respiration et la reproduction. Ainsi, les eaux acidifiées sont caractérisées par un déclin de la diversité biologique. Le pH de l'eau influence également la quantité de nutriments (ex. : phosphore, azote) et de métaux lourds (ex. : plomb, mercure, cuivre) dissous dans l'eau et disponibles pour les organismes aquatiques. Dans des conditions acides, certains métaux lourds toxiques se libèrent des sédiments et deviennent disponibles pour l'assimilation par les organismes aquatiques. Et les eaux dont les pH sont élevés présentent une augmentation des concentrations d'ammoniac, toxique pour les poissons. Nous admettons généralement qu'un pH naturel situé entre 6,5 et 8,5 caractérise des eaux où la vie se développe de manière optimale [18]. Ce paramètre est donc d'une grande importance dans l'activité biologique car un pH acide ou basique est un signe direct de pollution.

Ainsi, la connaissance du pH constitue donc un outil indispensable pour le suivi de la condition de vie des êtres vivants.

Enfin, les variations des valeurs du pH ont une influence sur les autres paramètres caractéristiques d'une eau, il est ainsi nécessaire de les surveiller afin d'éviter toutes interférences négatives avec d'autres paramètres de l'environnement qui peuvent bouleverser l'écosystème.

La classification des eaux selon leur pH est représentée dans le tableau suivant :

$pH < 5$	Acidité forte
$pH = 7$	Neutralité
$7 < pH < 8$	Neutralité approchée
$5,5 < pH < 8$	Majorité des eaux souterraines
$pH = 8$	Alcalinité forte, évaporation intense

Tableau 4 Classification des eaux d'après leur pH

Les facteurs qui influencent le pH d'un lac sont [22] :

- L'environnement physique : le facteur le plus important est la géologie du sol. Si les calcaires ou les marbres dominent, l'eau sera basique et aura la capacité de neutraliser les pluies acides. En présence de roche granitique, l'eau a déjà une tendance acide et sera très sensible à des apports supplémentaires en eaux acides (pollution ou autres) ;
- L'activité des organismes aquatiques : le dioxyde de carbone (CO_2), issu de la respiration des organismes, a un effet acidifiant sur l'eau des lacs. Toutefois, ce phénomène est en partie compensé par les organismes qui utilisent le CO_2 lors de la photosynthèse, ce qui a pour effet d'augmenter le pH de l'eau (l'eau devient moins acide) ;
- La pollution : les eaux usées et les pluies acides sont une source de pollution qui provient de phénomènes naturels (éruptions volcaniques, feux de forêts, etc.), mais surtout des combustibles fossiles (transport, production d'électricité) sont susceptibles de perturber l'équilibre d'un lac.

2.5.4 Température

D'une part, la température est un paramètre fondamental pour l'évaluation des caractéristiques des masses d'eaux car elle joue un rôle important dans la variabilité des cycles biologiques.

La température de l'eau joue un rôle important par exemple en ce qui concerne la solubilité des sels et des gaz dont, entre autres, l'oxygène nécessaire à l'équilibre de la vie aquatique. Par ailleurs, la température accroît les vitesses des réactions chimiques et biochimiques d'un facteur 2 à 3 pour une augmentation de température de 10 degrés Celsius ($^{\circ}C$) [21]. L'activité métabolique des organismes aquatiques est donc également accélérée lorsque la température de l'eau s'accroît. La valeur de ce paramètre est influencée par la température ambiante mais également par d'éventuels rejets d'eaux résiduaires chaudes. Des changements brusques de température de plus de $3^{\circ}C$ s'avèrent souvent néfastes [19]. Le contrôle de la température est essentiel pour la survie des êtres vivants.

Par conséquent, pour les animaux poïkilothermes (ectothermes) comme les poissons, le seuil de la température optimale pouvant varier en fonction des espèces, doit être respecté. La température adaptée à l'élevage sera la plus élevée à l'intérieur du seuil optimal afin de maintenir la meilleure vitesse de croissance. Des effets négatifs sur le métabolisme du poisson peuvent être provoqués non seulement par de fausses valeurs absolues de la température, mais aussi par leurs variations (intensité et vitesse), qui dépendent de la température dans laquelle les poissons sont acclimatés. Ces effets négatifs sont plus accentués quand la différence est éloignée du seuil optimal.

Généralement, des températures élevées augmentent les risques pathologiques comme l'augmentation de la vitesse d'expansion de maladies bactériennes [18]. Plus encore, et particulièrement dans un élevage extensif, beaucoup d'effets négatifs peuvent être induits par des stratifications thermiques dans l'eau. La température est donc un paramètre qui influe sur l'activité biologique dont dépend la vie, la production totale, et sur la répartition des espèces : un paramètre à ne pas négliger.

De plus, en mettant en évidence des contrastes de température de l'eau sur un milieu, il est possible d'obtenir des indications sur l'origine et l'écoulement de l'eau ou encore sur l'origine des rejets d'eaux chaudes provoquant la pollution thermique. La connaissance de la température est donc une source de données sur le milieu concerné et le milieu environnant.

D'autre part, la mesure de la température est indispensable pour l'interprétation ou le traitement d'autres paramètres (salinité, oxygène dissous, ...). Par exemple, la saturation des gaz dissous est fonction de la température et la mesure du pH requiert la connaissance de la température [19].

De plus, la température de l'eau influe beaucoup sur d'autres paramètres. C'est en premier lieu le cas pour l'oxygène dissous indispensable à la vie aquatique. Plus la température de l'eau s'élève, plus la quantité d'oxygène dissous diminue. Une température trop élevée des eaux peut donc aboutir à des situations dramatiques de manque d'oxygène dissous pouvant entraîner : la disparition des espèces, la réduction de l'autoépuration, l'accumulation des dépôts nauséabonds, la croissance accélérée des végétaux (dont les algues).

La température associée à d'autres paramètres permet également d'avoir une meilleure connaissance du milieu, par exemple, la température est, avec la salinité, un des descripteurs de base d'un milieu pour calculer la masse volumique de l'eau. La température du lac est donc l'un des principaux paramètres qui permet d'expliquer non seulement le fonctionnement physique du lac mais aussi les facteurs biologiques.

2.5.5 Profondeur

À l'échelle humaine, les lacs ne semblent pas évoluer et pourtant comme tout élément naturel, ils se créent, se modifient et disparaissent. Toute surface lacustre est soumise à des variations de niveau, du fait des apports d'eau, de l'évaporation, des pompages et des écoulements à l'émissaire [20]. Le vent agit aussi fortement sur le fonctionnement et la morphologie des lacs. Il crée notamment un déplacement général des eaux superficielles vers le côté du lac sous le vent. L'amplitude de la dénivellation produite est fonction de la forme et de la profondeur du lac. Elle est plus forte dans les lacs peu profonds et allongés. La variation du niveau des eaux a donc plusieurs origines et doit être surveillée.

Premièrement, au fur et à mesure de milliers, voire de millions d'années, les sédiments se déposent au fond des lacs, s'accumulent sur des mètres ou dizaines de mètres à cause de la déforestation en bordure des plans d'eau. Dans le même temps, les tourbières ou ceintures de végétation arborée peuvent coloniser la partie centrale d'un lac peu profond. Un lac peut ainsi finir par évoluer vers un réseau d'étangs, puis une zone de marais, puis une tourbière et une forêt alluviale humide (dans les zones restantes suffisamment humides) et, enfin, être totalement comblé. Il est donc important d'effectuer un suivi de la profondeur d'un lac afin de minimiser de telles risques puisqu'elle permet d'avoir conscience des facteurs entraînant la variation du niveau d'un lac ainsi que sa superficie et éviter sa disparition ainsi que celle des êtres vivants qu'il abrite. La profondeur est donc un paramètre qui offre des informations sur les milieux environnants.

Deuxièmement, sachant que la quantité d'eau présente dans un lac peut varier suivant les apports et les pertes (Figure 10) ; la surveillance temporelle de la profondeur d'un permet de savoir l'équilibre des entrées et des sorties.

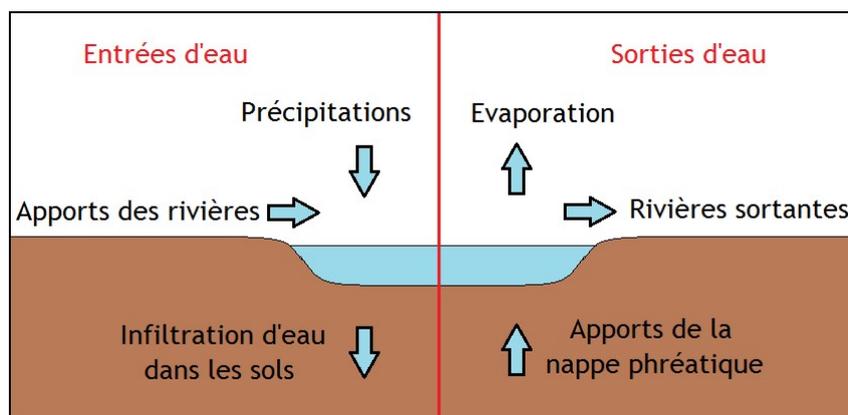


figure 10 Les apports et pertes en eau dans un lac

Troisièmement, la diminution de la quantité d'eau dans les lacs peut entraîner une augmentation de la salinité, qui à son tour joue un rôle décisif dans la détérioration de la faune et de la flore [18]. De ces différents éléments, découlent des problèmes qui touchent directement l'écosystème aquatique et les populations locales. De fait, les cultures ne sont plus suffisamment irriguées et de nombreuses espèces de poissons disparaissent puisque le milieu devient invivable. De plus, l'assèchement d'une grande partie d'un lac peut entraîner l'accroissement de la turbidité des eaux. Ce dernier étant mal supporté par de nombreuses espèces, d'où la nécessité du suivi du paramètre profondeur qui a donc une influence importante sur les autres paramètres du lac.

2.5.6 Turbidité

La turbidité est due à la présence dans l'eau de particules en suspension minérales ou organiques, vivantes ou détritiques : c'est-à-dire la concentration en Matières En Suspension (MES). Elles incluent les argiles, les sables, les limons, les matières organiques et minérales de faible dimension, le plancton et autres micro-organismes de l'eau [19].

On peut apprécier la turbidité à l'œil nu, puisque les MES affectent la transparence de l'eau ; lorsque l'eau est turbide, elle semble trouble, ce qui est un indice visuel de qualité de l'eau. Le suivi de la turbidité est un indicateur important et très révélateur de la qualité de l'eau. L'augmentation de la turbidité engendre souvent une augmentation de la température de l'eau, car l'énergie des rayons lumineux est absorbée par les particules en suspension. On sait également que plus la température de l'eau est élevée, plus la solubilité de l'oxygène dissous dans l'eau est faible [18]. Nous comprenons donc aisément l'une des conséquences à surveiller directement la turbidité de l'eau puisque ce paramètre a des influences importantes sur les autres paramètres caractéristiques de l'eau.

De plus, la turbidité est un facteur écologique important, qui peut traduire une pollution ou eutrophisation de l'eau, cause éventuelle d'*asphyxie* (par anoxie) du milieu ou de colmatage des branchies des poissons. L'apport plus ou moins important de matières solides en suspension dans l'eau vient en effet détériorer son état, pouvant perturber très significativement le milieu aquatique (allant jusqu'à le rendre inapte aux conditions de vie pour la faune et la flore) et son aptitude à la potabilisation pour la consommation humaine. Par ailleurs, les matières en suspension peuvent accumuler des quantités élevées de matières toxiques (métaux, pesticides, huiles minérales, hydrocarbures aromatiques polycycliques...). Ainsi, la surveillance de la turbidité de l'eau est indispensable pour limiter, voire éviter la dégradation du milieu de vie des êtres vivants.

Enfin, la turbidité est souvent un marqueur d'une pression anthropique telle que : la déforestation qui induit un bassin versant non végétalisé, la présence de bateaux du type dragage, l'activité humaine perturbant la terre (par exemple la construction), les activités extractives (carrières, mines) etc. Elle permet donc d'avoir des connaissances sur le milieu environnant et est un paramètre représentatif de l'état de vieillissement de l'eau.

Les turbidités usuelles sont classifiées dans le tableau suivant :

Turbidité	Caractéristique de l'eau
< 5	Eau claire
5 – 30	Eau légèrement trouble
> 50	Eau trouble

Tableau 5 Les turbidités usuelles

Le tableau suivant résume des normes de qualité de base pour les eaux de surfaces ordinaires

Paramètres	Unités	Valeurs
pH		6 à 9
Accroissement de T° après mélange	$^{\circ}C$	3
Température	$^{\circ}C$	25
Oxygène dissous	% saturation	50
Salinité	g/L	1 à 10
Turbidité	FNU	5 à 30

Tableau 6 Normes de qualité de base pour les eaux de surface ordinaires

Lorsque nous disposons d'une série de mesures ordonnées de manière croissante ou décroissante, la valeur médiane correspond à l'observation qui se trouve au point milieu de cette liste ordonnée. Le recours à la médiane plutôt qu'à la moyenne permet d'éviter qu'une mesure ponctuelle mettant en évidence une concentration exceptionnellement élevée d'un polluant (suite à un rejet accidentel par exemple) n'entraîne systématiquement un dépassement de la norme.

3. Architecture et fonctionnalités de la plateforme

3.1 Vue d'ensemble initiale

La plateforme de suivi hydro-climatique de l'Itasy a été conçue pour être un outil de référence, à la fois informatif et interactif, au service de la gestion durable des ressources en eau de la région. Elle s'adresse aux agriculteurs, pêcheurs, gestionnaires et à tout citoyen désireux de comprendre et d'anticiper les variations climatiques et hydrologiques. Son architecture combine des données en temps réel, des prévisions détaillées et des visualisations cartographiques dynamiques pour une prise de décision éclairée.

Sur la page d'accueil, l'utilisateur est immergé dans un environnement riche en informations. La page est divisée en plusieurs sections distinctes, chacune ayant un rôle précis.

3.1.1 Météo du jour et données clés

Un panneau de bienvenue présente l'Institut et l'Observatoire Hydro-climatique de l'Itasy, décrivant sa mission et soulignant l'importance de son rôle.

Juste à côté, un module météorologique quotidien fournit un aperçu synthétique des conditions actuelles. L'utilisateur peut y sélectionner l'une des stations de mesure de la région afin d'afficher des informations précises comme la température (minimale, maximale et moyenne), les précipitations, la vitesse du vent et l'heure du lever du soleil.

En parallèle, un résumé visuel affiche les températures moyennes de plusieurs villes de l'Itasy, offrant un aperçu instantané du climat régional.



figure 11 Météo du jour et données clés

3.1.2 Prévisions hebdomadaires et tendances

Cette section est conçue pour aider à la planification à moyen terme. L'utilisateur peut choisir une station et consulter des graphiques détaillés des prévisions pour la semaine à venir.

- Un graphique des températures illustre l'évolution des températures minimales, maximales et moyennes jour après jour.
- Un graphique des précipitations montre les cumuls attendus, ce qui est crucial pour la gestion des cultures et des activités dépendantes de l'eau.

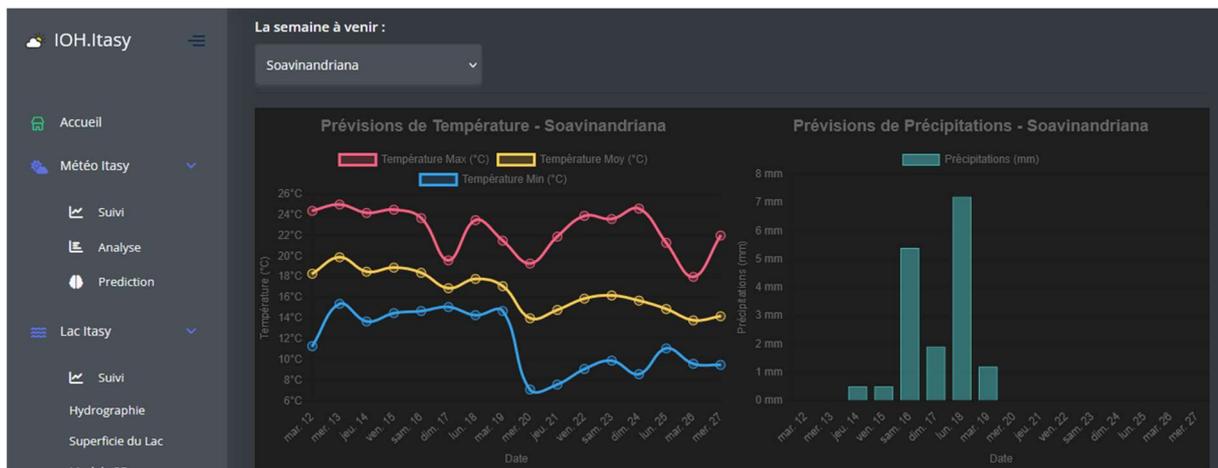


figure 12 Prévision et tendances

3.1.3 *Cartes dynamiques et animations*

C'est l'une des fonctionnalités les plus innovantes de la plateforme. Des cartes interactives permettent de visualiser des phénomènes complexes de manière simple et intuitive.

- Des cartes animées affichent les prévisions de température, de vent et de précipitations sur une période de 24 heures.
- Grâce à des contrôles de lecture intuitifs (lecture/pause, suivant/précédent, et un curseur temporel), l'utilisateur peut animer les cartes et observer la progression des phénomènes météorologiques au fil des heures. Cette fonctionnalité est essentielle pour anticiper les crues, les rafales de vent ou les mouvements des masses nuageuses.

En combinant ces différents outils, la plateforme se positionne comme un centre de données essentiel et accessible, transformant les données brutes en informations exploitables pour la population d'Itasy.

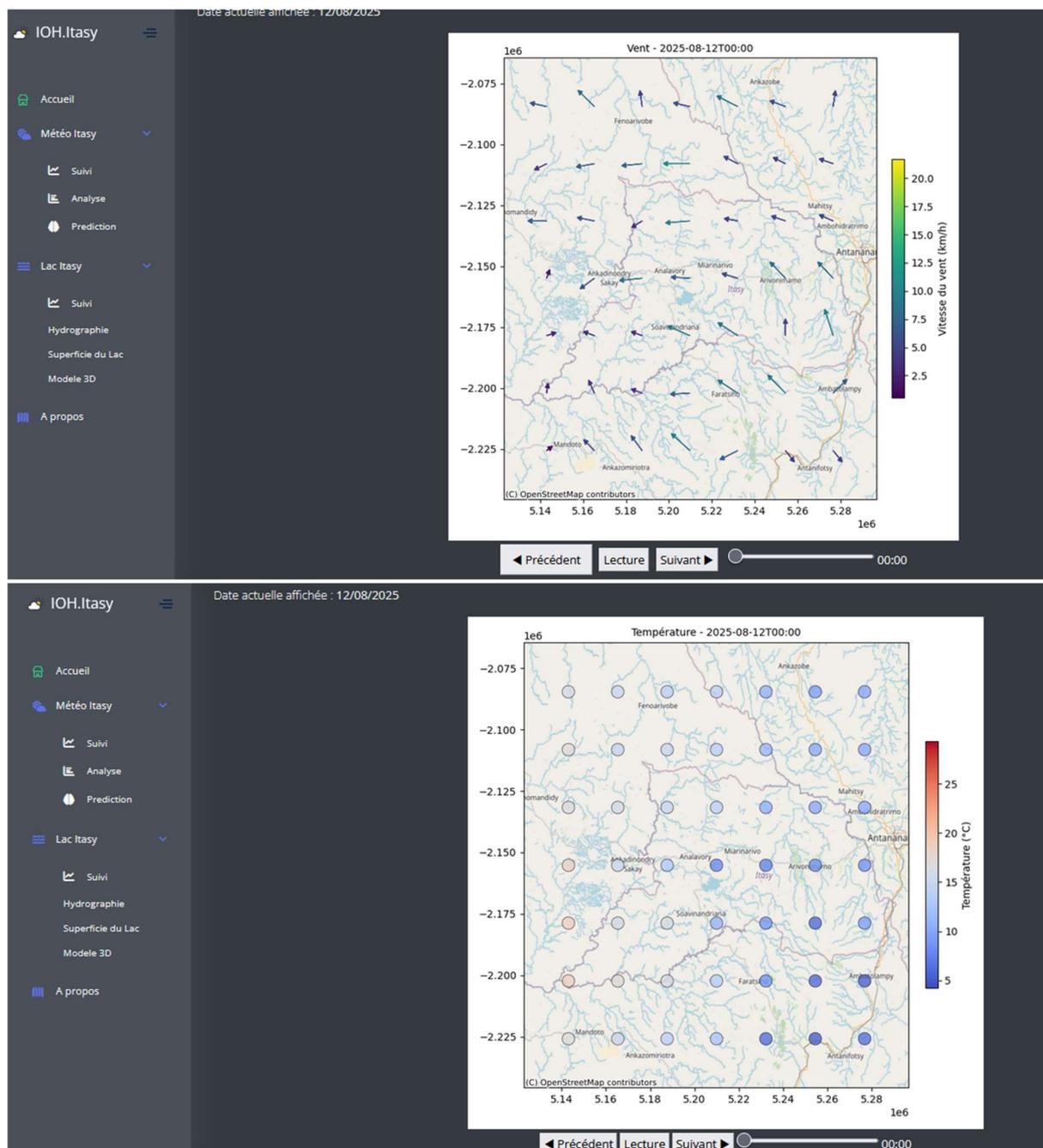


figure 13 Données cartographiques du vent et température

3.2 Section météo

Cette section de la plateforme offre la possibilité d'explorer en profondeur les données hydro-climatiques de la région d'Itasy sur des périodes spécifiques. Contrairement à la page d'accueil qui se concentre sur les prévisions et l'instant présent, cette page est un outil d'analyse rétrospective et de consultation détaillée. Cette section est un atout majeur de la plateforme, car elle permet de passer d'une simple consultation à une véritable analyse des données historiques. Elle transforme la plateforme en un outil d'apprentissage et d'étude des tendances climatiques, indispensable pour la recherche et la prise de décisions à long terme.

3.2.1 Interface de requête et de personnalisation

L'interface est conçue pour être à la fois simple et puissante. Elle permet à l'utilisateur de définir exactement ce qu'il souhaite consulter.

- **Sélection de station** : Un premier menu déroulant permet de choisir la station météo ou la localisation pour laquelle l'utilisateur désire des informations. Cela garantit que les données affichées sont pertinentes pour un lieu précis de la région.
- **Choix de la variable** : Un second menu propose une liste complète des variables hydro-climatiques disponibles. L'utilisateur peut ainsi afficher l'évolution de la température, des précipitations totales, de la force et de la direction du vent, de l'indice UV, et même des heures de lever et de coucher du soleil.
- **Période de temps** : Deux champs de date (début et fin) permettent de définir une plage de temps spécifique à analyser. L'utilisateur peut ainsi étudier l'impact d'une saison, d'un événement climatique passé ou simplement observer les tendances sur plusieurs jours, semaines, ou mois.
- **Protection des données** : L'accès aux archives complètes du système est contrôlé par un mécanisme de sécurité pour des raisons de protection des données.

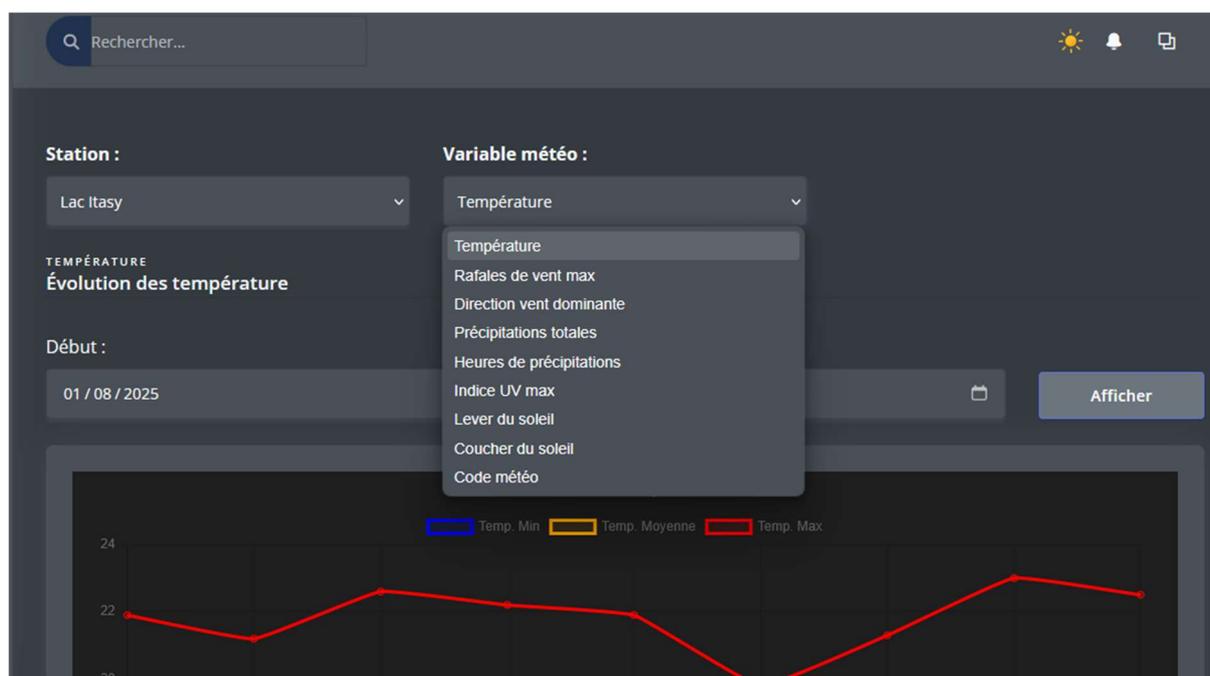


figure 14 Interface de requête

3.2.2 Visualisation interactive des données

Le cœur de cette section est un grand graphique qui se met à jour dynamiquement en fonction des sélections de l'utilisateur.

- **Graphique évolutif** : Une fois la station, la variable et la période choisies, et l'accès validé, un graphique détaillé apparaît. Il montre l'évolution de la variable sélectionnée au fil du temps.
- **Multiplés variables** : Pour les températures, le graphique est particulièrement riche, car il affiche simultanément trois courbes distinctes : une pour la température minimale, une pour la température moyenne et une pour la température maximale. Cette comparaison visuelle est essentielle pour comprendre les variations journalières.

- **Adaptabilité** : Pour les autres variables (précipitations, vent, ...), le graphique s'ajuste pour présenter une seule courbe pertinente, avec l'unité de mesure appropriée (mm, km/h, ...).

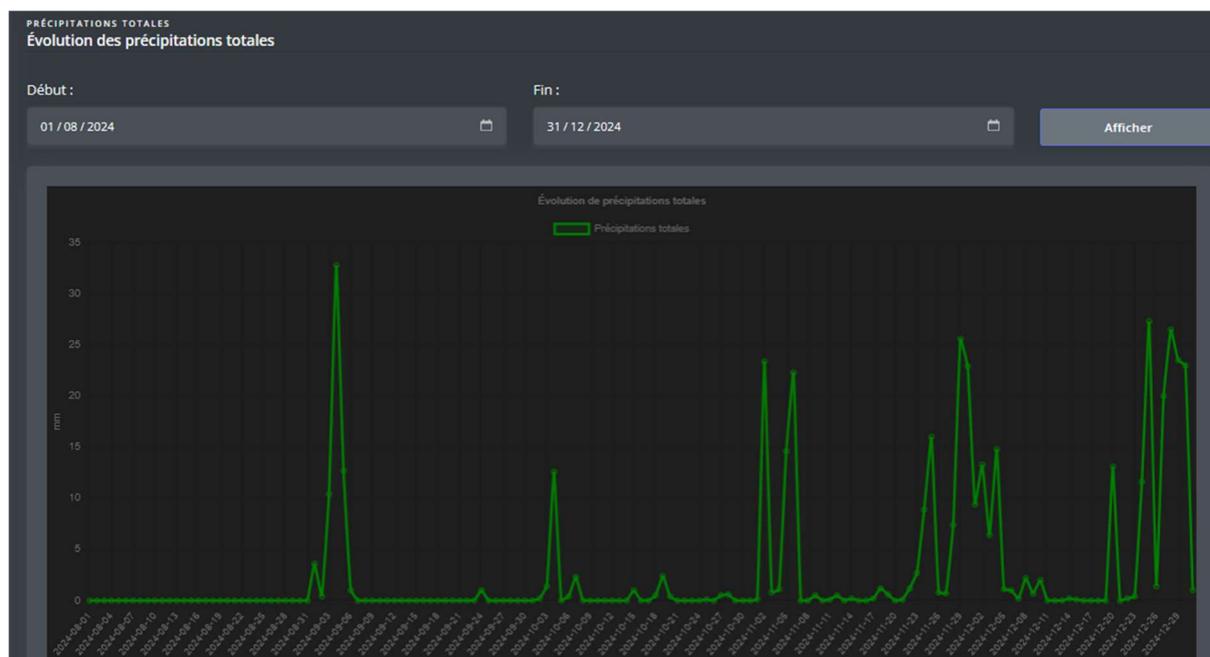


figure 15 Courbes interactives des données

3.2.3 Analyse comparative multi-période

Cette composante de la plateforme constitue un outil analytique de pointe, dédié à l'étude des tendances climatiques à long terme dans la région de l'Itasy. Elle permet aux chercheurs et aux experts d'analyser et de comparer l'évolution de variables environnementales sur plusieurs périodes annuelles distinctes, facilitant ainsi l'identification des variations interannuelles, des tendances séculaires et des anomalies climatiques.

❖ Architecture et paramétrisation de l'interface

L'interface utilisateur est conçue pour une requête de données ciblée et paramétrable, garantissant la pertinence des résultats pour des études spécifiques.

- **Sélection des variables** : L'utilisateur peut choisir parmi une gamme étendue de variables météorologiques. Cette granularité permet une analyse spécifique de phénomènes précis.
- **Sélection temporelle** : La plateforme offre la possibilité de sélectionner et de superposer plusieurs années pour une comparaison simultanée. La plage de données disponibles, s'étendant de l'année en cours jusqu'en 2005, offre une perspective historique riche pour la modélisation et l'analyse statistique.
- **Sélection spatiale** : L'utilisateur peut choisir une station spécifique pour laquelle l'analyse comparative sera effectuée, permettant une évaluation des dynamiques hydro-climatiques à l'échelle locale.
- **Contrôle d'accès** : Un mécanisme d'authentification sécurise l'accès aux archives de données. Ce protocole garantit l'intégrité des informations et limite l'accès aux utilisateurs autorisés, conformément aux principes de gestion des données sensibles.

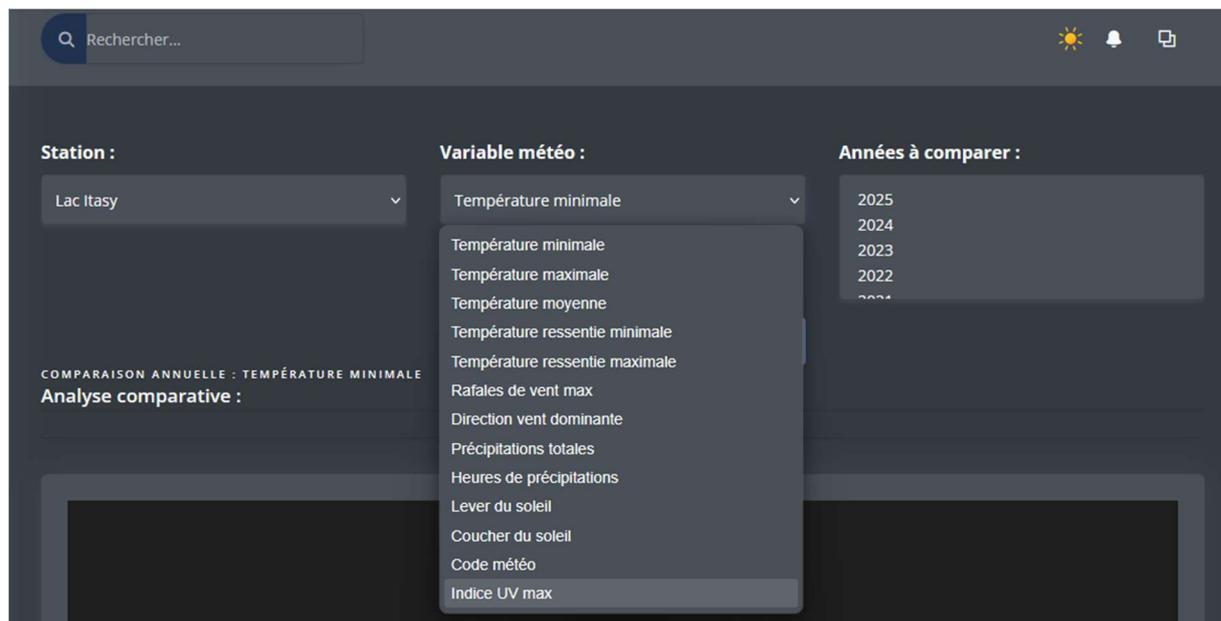


figure 16 Interface de requête

❖ Méthodologie de Visualisation et d'analyse

La visualisation des résultats repose sur une représentation graphique sophistiquée, optimisée pour l'analyse comparative.

- **Représentation graphique :** Les résultats sont présentés sous la forme d'un graphique linéaire diachronique, où chaque courbe représente l'évolution mensuelle d'une variable pour une année donnée. Cette superposition graphique permet une comparaison visuelle directe des modèles saisonniers et des écarts entre les années sélectionnées.
- **Normalisation et lisibilité :** Chaque série de données (chaque année) est différenciée par une couleur distincte, avec une légende associée pour une identification immédiate. Les axes du graphique sont clairement étiquetés, avec l'axe horizontal représentant les mois de l'année et l'axe vertical indiquant les valeurs moyennes mensuelles de la variable, accompagnée de son unité de mesure (ex : °C, mm).

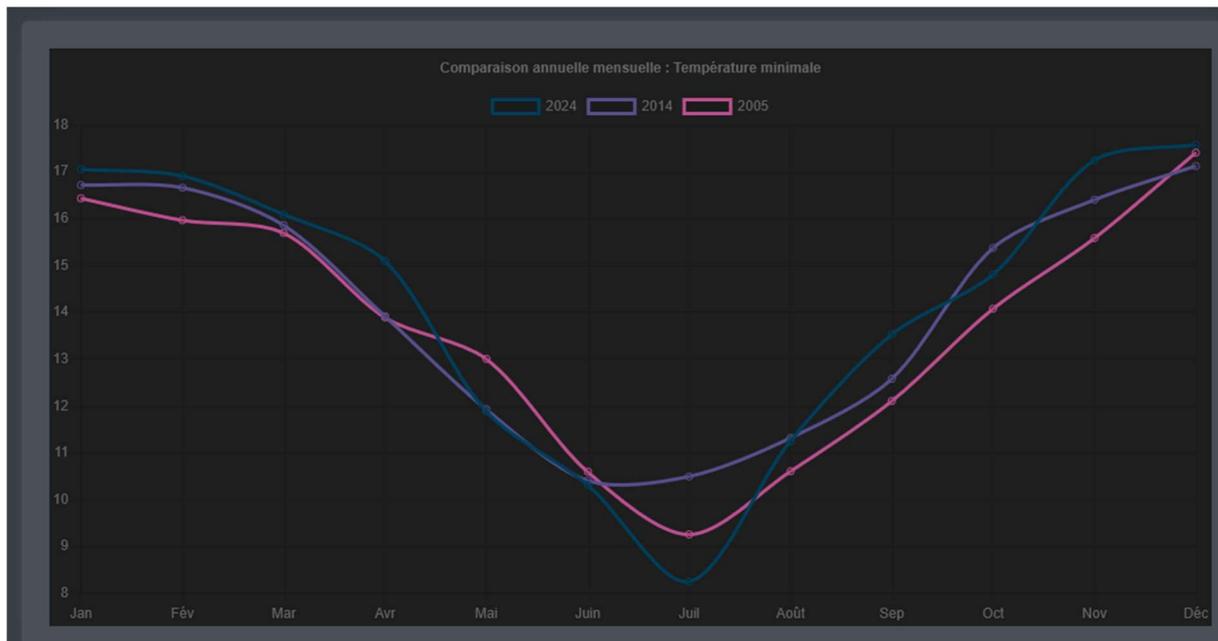


figure 17 Courbe comparative de la T_{min} : 2024,2014, 2005

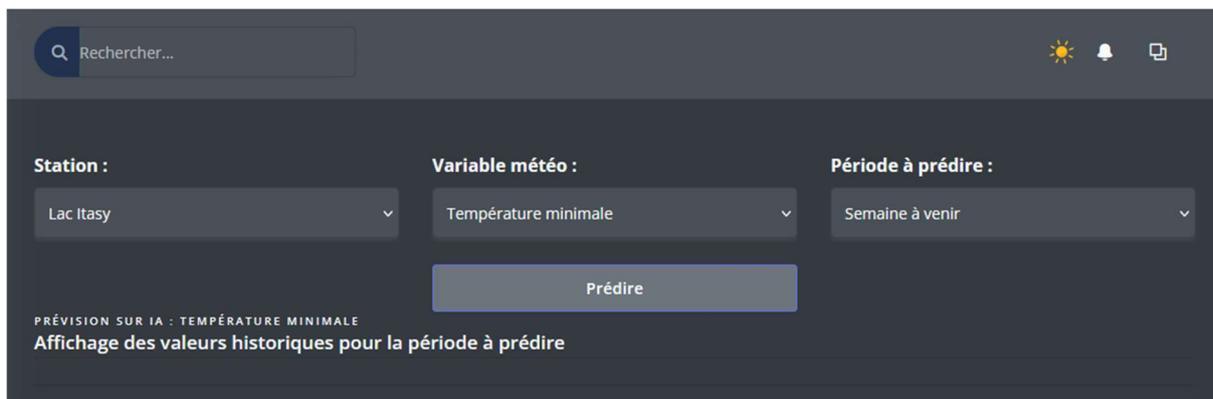
3.2.4 Outil de prédiction climatologique basé sur des modèles prédictifs

Contrairement aux sections précédentes qui se focalisaient sur la consultation ou la comparaison de données passées, cette interface est conçue pour l'anticipation des phénomènes météorologiques. Cette section de la plateforme présente un outil d'analyse prédictive. L'objectif est de fournir des projections climatiques à court et moyen terme en s'appuyant sur les données historiques collectées.

❖ Architecture

L'interface de cette section permet une configuration précise des paramètres de prédiction :

- ✓ **Sélection de la station** : La prédiction s'applique à une station spécifique. Le choix d'une localisation de référence garantit une projection cohérente avec les conditions locales.
- ✓ **Sélection des variables** : Un menu déroulant offre une sélection exhaustive de variables à prédire, incluant les différentes mesures de température (T_{min} , T_{max} , T_{moy}), les rafales de vent, les précipitations, et les paramètres de rayonnement solaire (indice UV) etc...
- ✓ **Sélection de la période de prédiction** : L'utilisateur peut définir l'horizon temporel de la prédiction en choisissant une période prédéfinie :
 - ✓ Semaine (7 jours à venir)
 - ✓ Mois (30 jours à venir)
 - ✓ Mi-année (6 mois à venir)
 - ✓ Année (12 mois à venir)
- ✓ **Contrôle d'accès** : L'exécution des prédictions et l'accès aux résultats sont sécurisés par un mécanisme d'authentification. Ce protocole assure la protection des données et limite l'utilisation du modèle de prédiction aux utilisateurs autorisés.



Rechercher...

Station : Lac Itasy

Variable météo : Température minimale

Période à prédire : Semaine à venir

Prédire

PRÉVISION SUR IA : TEMPÉRATURE MINIMALE
Affichage des valeurs historiques pour la période à prédire

figure 18 Interface de requête pour la prédiction

❖ Méthodologie de visualisation des projections

Les résultats des prédictions sont présentés de manière graphique, avec une méthodologie axée sur la transparence et la comparaison avec les tendances passées.

- ✓ **Graphique de prédiction** : Un graphique linéaire affiche les valeurs projetées de la variable choisie sur la période sélectionnée. Le titre du graphique et ses étiquettes sont automatiquement mis à jour pour refléter la variable et la nature prédictive de l'analyse.
- ✓ **Modèle de prédiction** : La méthodologie de prédiction repose sur l'utilisation d'un modèle hybride de réseau de neurones à mémoire court-terme (LSTM) et de modèle statistique SARIMA [23], une architecture d'apprentissage automatique reconnue pour sa capacité à traiter et à prédire des séries temporelles. Ce modèle est entraîné à partir de l'analyse des données historiques, ce qui lui permet de reconnaître les tendances cycliques et les variations saisonnières propres à chaque variable climatique.

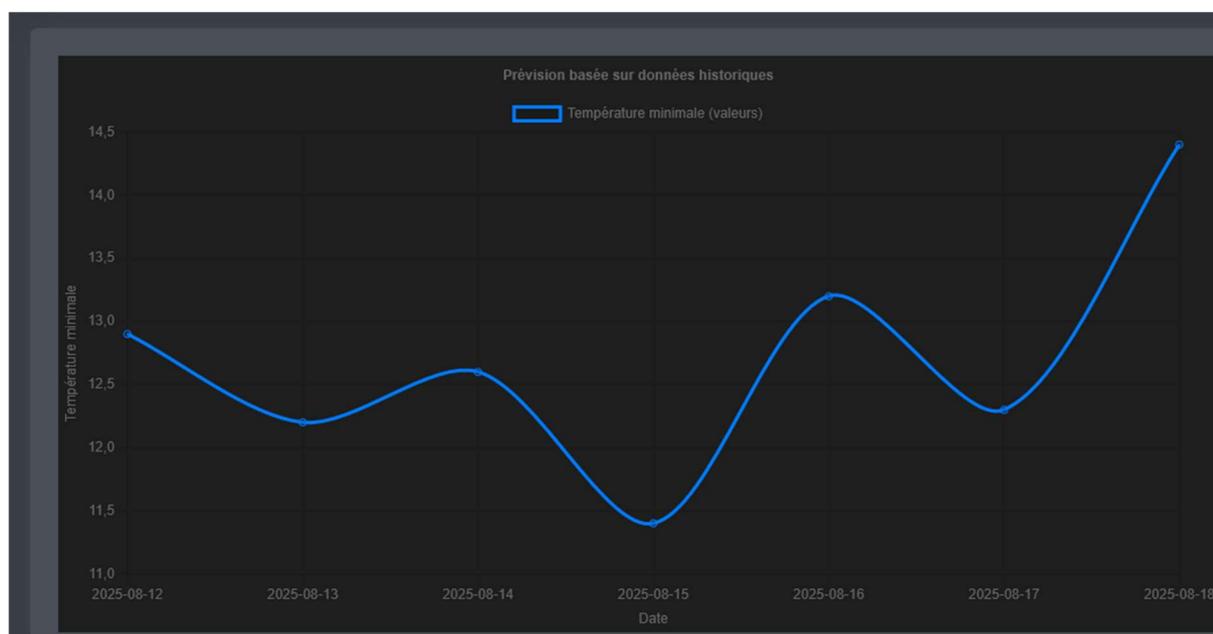


figure 19 Exemple de courbe de prédiction – Température minimale

3.3 Suivi hydrologique et de la qualité de l'eau du Lac Itasy

Cette section est un tableau de bord analytique conçu pour le suivi en temps réel et historique des paramètres hydrologiques et de la qualité de l'eau du Lac Itasy. Elle permet d'examiner les dynamiques de l'écosystème aquatique à travers une série de visualisations graphiques.

3.3.1 Interface et Méthodologie

L'interface est structurée pour faciliter l'exploration des données et la personnalisation de l'analyse.

- ❖ **Sélection du point de mesure :** Un menu déroulant permet de choisir parmi plusieurs points de mesure, mais aussi ses affluents ou sa sortie. Cette fonctionnalité est cruciale pour une analyse spatiale de l'hydrologie.
- ❖ **Sélection temporelle :** L'utilisateur peut définir la période d'étude en spécifiant des dates de début et de fin, à l'aide d'un sélecteur de date. Cela permet d'analyser les données sur des intervalles précis, facilitant l'étude d'événements spécifiques (par exemple, une saison des pluies ou un épisode de sécheresse). Un bouton "Rechercher" lance la requête et met à jour l'ensemble des graphiques.



figure 20 Interface de suivi

3.3.2 Visualisation des données

La section présente une série de graphiques linéaires, chacun dédié à une variable clé. Ces graphiques permettent de visualiser les tendances sur la période sélectionnée.

- ❖ **Qualité de l'eau :** Plusieurs graphiques sont dédiés aux paramètres physico-chimiques de l'eau, essentiels pour évaluer la santé de l'écosystème :
 - ✓ Température de l'eau (°C)
 - ✓ pH de l'eau
 - ✓ Salinité (g/kg)

- ✓ Conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
- ✓ Turbidité (NTU)
- ✓ Taux d'oxygène dissous (mg/L)

❖ **Dynamiques hydrologiques** : d'autres graphiques se concentrent sur les aspects physiques et les mouvements de l'eau :

- ✓ Niveau du lac (m) : ce graphique permet de suivre les variations du niveau d'eau, une information clé pour la gestion des ressources en eau.
- ✓ Vitesse du courant (m/s) : ce graphique montre la vitesse du courant à différents points stratégiques (affluents et sortie du lac), fournissant des données sur les flux d'entrée et de sortie.

Chaque graphique est clairement étiqueté avec son titre, l'unité de mesure et les légendes nécessaires. La présentation visuelle est conçue pour être réactive et accessible ce qui améliore la lisibilité.

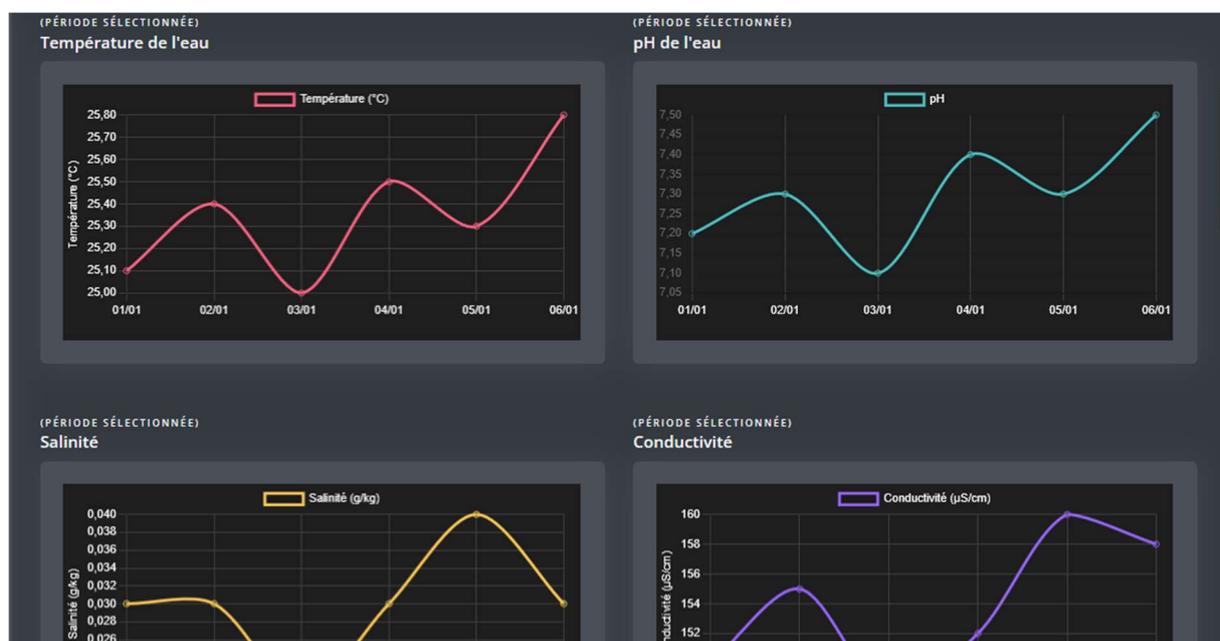


figure 21 Courbe de suivi

3.3.3 Cartographie interactive et analyse géospatiale du Lac Itasy

Cette section propose une interface de cartographie interactive qui fournit une analyse géospatiale approfondie du Lac Itasy et de son écosystème environnant. Développée en utilisant les capacités de l'API de Google Earth Engine (GEE) et de la bibliothèque geemap, cette fonctionnalité est un outil de recherche pour la compréhension des dynamiques hydrologiques et topographiques de la région.

La carte intègre et visualise plusieurs couches de données, chacune offrant un éclairage spécifique sur l'environnement du lac :

- **Données topographiques** : La carte utilise les données du modèle numérique d'élévation (SRTM) pour visualiser la pente et l'orientation du terrain. Ces informations sont cruciales pour modéliser les flux d'eau et comprendre l'érosion.
- **Hydrologie et bassin versant** : Les contours du bassin versant sont clairement délimités. La carte intègre également un fichier de forme représentant le réseau hydrographique, incluant les rivières et les affluents qui alimentent le lac. Des

calculs en arrière-plan permet de déterminer la surface du bassin versant, fournissant une donnée essentielle pour les bilans hydrologiques.

- **Délimitation du lac :** La délimitation de la surface du lac est réalisée à partir d'images satellite Sentinel-2. L'algorithme se base sur l'indice normalisé de différence d'eau (NDWI) pour masquer les pixels contenant de l'eau, permettant ainsi de visualiser l'étendue du lac avec précision pour une période donnée. Le calcul de la surface du lac est également une fonctionnalité intégrée.

L'interface de la carte est conçue pour l'interaction et l'analyse.

- **Interaction :** L'utilisateur peut interagir avec la carte, zoomer, dézoomer et naviguer. Un clic sur la carte affiche les coordonnées géographiques (latitude et longitude) du point sélectionné, ce qui est utile pour la géolocalisation des observations.
- **Affichage des couches :** Différentes couches thématiques (pente, direction du flux, contours du bassin versant, réseau hydrographique) peuvent être activées ou désactivées pour une visualisation personnalisée. Chaque couche utilise une palette de couleurs spécifique pour une meilleure lisibilité.

Cet outil géospatial est une ressource précieuse pour la gestion des bassins versants, la planification des ressources en eau et la surveillance des impacts du changement climatique sur les écosystèmes lacustres.

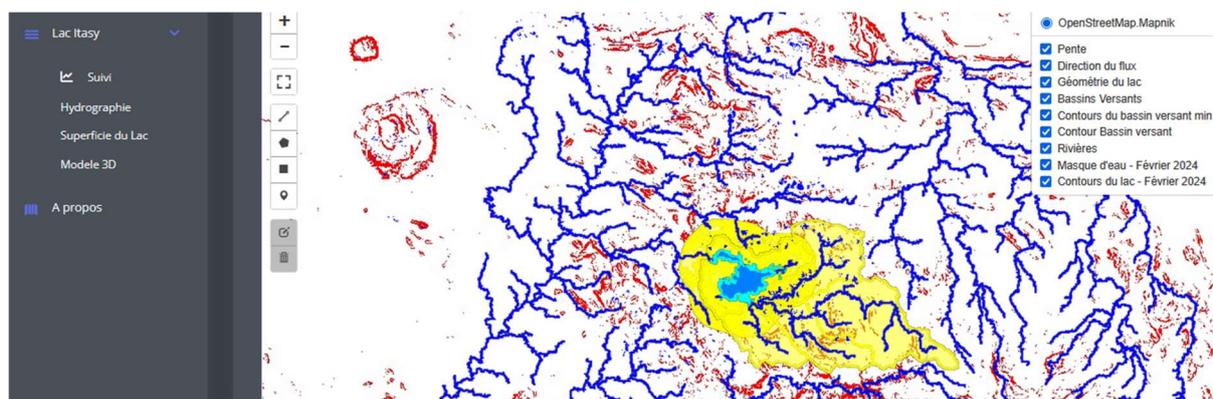


figure 22 Cartographie interactive du lac Itasy

3.4 Analyse et suivi de la superficie du Lac Itasy par télédétection

Cette section de la plateforme présente un outil d'analyse diachronique spécifiquement dédié au suivi de la superficie du Lac Itasy. La méthodologie repose sur l'exploitation des données satellitaires, notamment via l'API de Google Earth Engine, pour fournir une estimation fiable de l'étendue du lac au fil du temps.

3.4.1 Méthodologie de calcul

La méthode de base pour le calcul de la superficie consiste à maximiser la précision en minimisant les biais liés aux conditions atmosphériques :

- ❖ **Sélection des images satellite :** Pour chaque mois, la plateforme sélectionne jusqu'à cinq images satellites présentant la couverture nuageuse la plus faible et la meilleure qualité de données sur la zone d'étude.
- ❖ **Calcul de l'indice NDWI :** Un indice de différence normalisée d'eau (NDWI) est calculé pour chaque image. Cet indice utilise les bandes spectrales pour différencier les zones d'eau de la végétation et du sol, permettant une détection précise de la surface du lac.

- ❖ **Moyenne et estimation** : Une moyenne des images sélectionnées est ensuite utilisée pour produire une valeur agrégée par mois, qui sert à estimer la superficie du lac en kilomètres carrés (km²).

Pour obtenir des mesures plus précises et éviter de confondre l'eau avec les zones humides ou la végétation, plusieurs optimisations clés ont été effectuées par la suite intégrées.

Premièrement, le masquage des nuages est plus robuste, passant d'un simple filtre sur le pourcentage de nuages de la scène entière à une analyse pixel par pixel en utilisant la bande QA60 de Sentinel-2 ou la bande de classification de scène SCL (Scene Classification Layer ou Couche de Classification de Scène). Cette approche garantit que seuls les pixels réellement clairs sont pris en compte, éliminant efficacement nuages, cirrus et ombres. Deuxièmement, la détection de l'eau combine le NDWI (Indice Normalisé de Différence d'Eau) avec le NDVI (Indice Normalisé de Différence de Végétation). Cette logique combinée permet de classer un pixel comme de l'eau seulement s'il présente un NDWI élevé (caractéristique de l'eau) et un NDVI très bas ou négatif (caractéristique de l'absence de végétation), ce qui est crucial pour distinguer l'eau libre de la végétation humide. Les seuils appliqués à ces indices (par exemple, $NDWI > 0.15$ et $NDVI < 0.05$) sont des points de départ essentiels que l'on ajuste visuellement pour la zone d'étude, afin d'optimiser la précision.

Troisièmement, l'utilisation des images COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED assure que les données sont déjà corrigées des effets atmosphériques, rendant les calculs d'indices plus fiables et comparables dans le temps. Enfin, la fonction de score des meilleures images a été raffinée pour identifier les scènes qui contiennent le plus de pixels d'eau *clairement détectables* selon les nouveaux critères combinés, et le code inclut une meilleure gestion des erreurs et un suivi détaillé pour une robustesse accrue. Ces améliorations visent à fournir des estimations de la superficie du lac significativement plus justes et représentatives.

Notons qu'avec ces optimisations, les images répondant à l'ensemble de nos critères stricts (y compris un masquage nuageux précis et des pixels d'eau clairement identifiables) ne sont disponibles pour le lac Itasy qu'à partir de décembre 2018. Avant cette date, la couverture ou la qualité des données ne permet pas d'effectuer des analyses fiables selon cette méthodologie affinée.

3.4.2 Interface et visualisation des résultats

L'interface de cette section est simple et intuitive, conçue pour la comparaison visuelle et l'analyse des tendances :

- ❖ **Sélection d'années** : Un sélecteur permet à l'utilisateur de choisir une ou plusieurs années, de 2015 à l'année en cours, pour une comparaison de la superficie du lac.
- ❖ **Visualisation graphique** : Les données de superficie mensuelle sont affichées sous la forme d'un graphique à barres. Chaque année sélectionnée est représentée par un jeu de données distinct, permettant de comparer directement les variations saisonnières et interannuelles. Les mois sont affichés sur l'axe des abscisses, et la superficie en km² sur l'axe des ordonnées.
- ❖ **Analyse des tendances** : Ce graphique permet d'identifier facilement les périodes de crue et d'étiage, de comparer les surfaces d'eau d'une année sur l'autre et de détecter les tendances à long terme de l'étendue du lac, ce qui est essentiel pour comprendre les impacts du changement climatique sur l'écosystème.

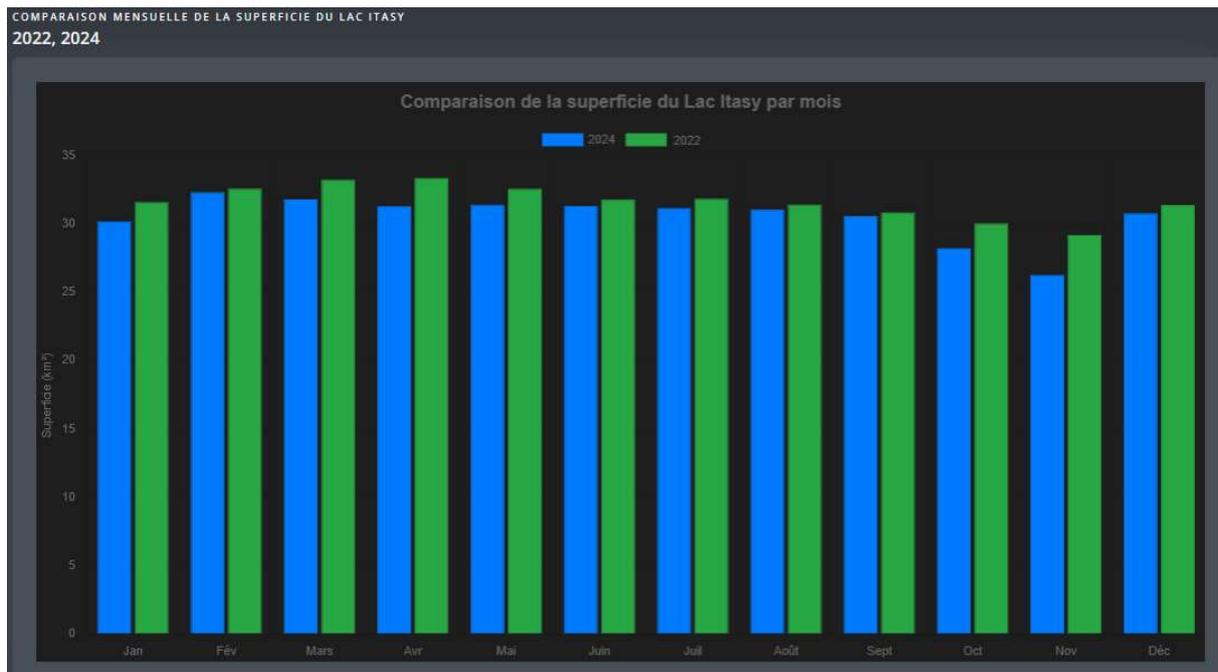


figure 23 Courbe comparative de la superficie du Lac Itasy : année 2022 et 2024

3.5 Modélisation numérique du Lac Itasy

Cette section propose une visualisation avancée de l'hydrologie du Lac Itasy à travers des modèles 3D interactifs. L'objectif est de permettre une compréhension des dynamiques de l'écosystème aquatique, notamment la bathymétrie, les flux d'eau et les points d'échange hydrologique

3.5.1 Représentation 3D du lac Itasy

Le modèle 3D est la pierre angulaire du modèle numérique du lac Itasy. Il sert de base fondamentale pour la simulation hydrodynamique, le transport de sédiments, l'analyse de la dispersion de la température, et bien d'autres dynamiques [24]. Ce modèle illustre la bathymétrie, c'est-à-dire la distribution des profondeurs dans le plan d'eau. Cette visualisation est essentielle pour distinguer les zones peu profondes des zones plus profondes, ce qui est crucial pour comprendre la distribution des habitats aquatiques et les dynamiques de stratification de l'eau.

De plus, le modèle intègre les points d'entrée des affluents et le point de sortie de l'exutoire. Ces éléments sont cruciaux pour l'analyse du bilan hydrologique du lac, en quantifiant les volumes d'eau entrants et sortants.

Un champ de vecteurs de vitesse est superposé sur le modèle bathymétrique pour représenter les flux hydrodynamiques simulés à l'échelle du lac. Ces vecteurs quantifient à la fois la direction et l'amplitude des courants, permettant de visualiser la circulation de l'eau et ses structures de mélange. Cette représentation est essentielle pour analyser la dispersion des polluants, le transport des nutriments, ainsi que d'autres processus biogéochimiques au sein de l'écosystème lacustre. Elle constitue également la base des modèles dérivés du lac, tels que le transport sédimentaire, l'envasement et l'évolution morphodynamique.

3.5.2 Animation de la Vitesse du Courant

Une seconde visualisation interactive se concentre spécifiquement sur l'animation des vecteurs de vitesse. Cette animation offre une vue dynamique des courants à la surface du lac, simulant le mouvement de l'eau. Elle illustre de manière concrète comment les flux se déplacent entre les affluents et l'exutoire, en réponse aux conditions hydrologiques du bassin. Cet outil est particulièrement pertinent pour :

- L'éducation et la sensibilisation aux processus hydrologiques.
- La recherche sur la modélisation des courants lacustres.
- La prise de décision en matière de gestion de la qualité de l'eau.

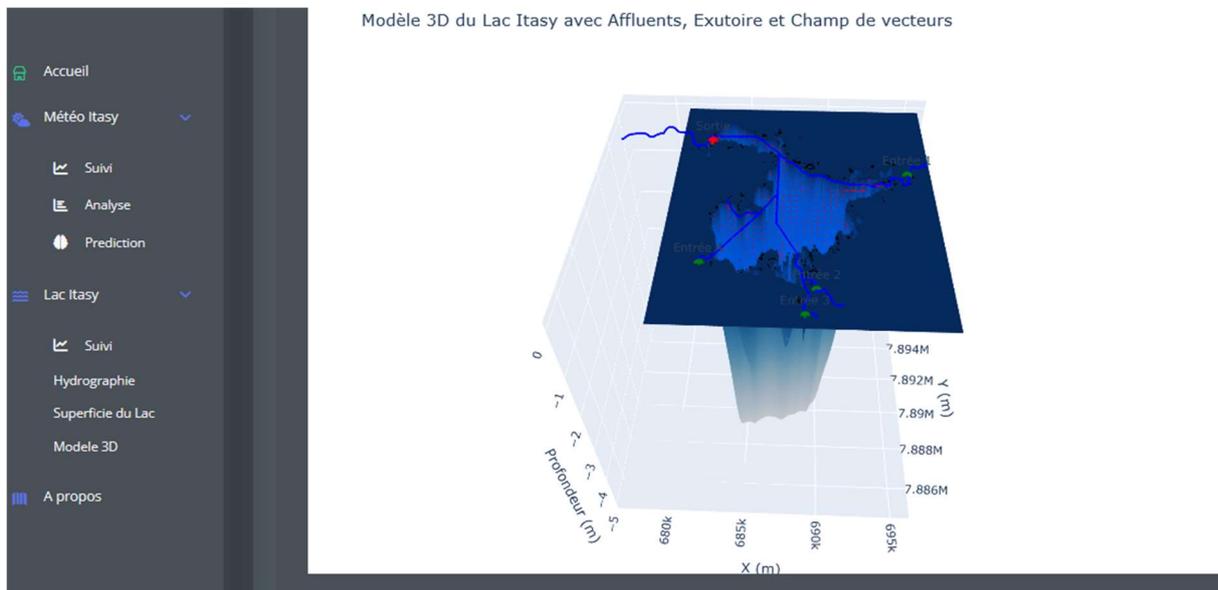


figure 24 Modèle 3D du lac Itasy

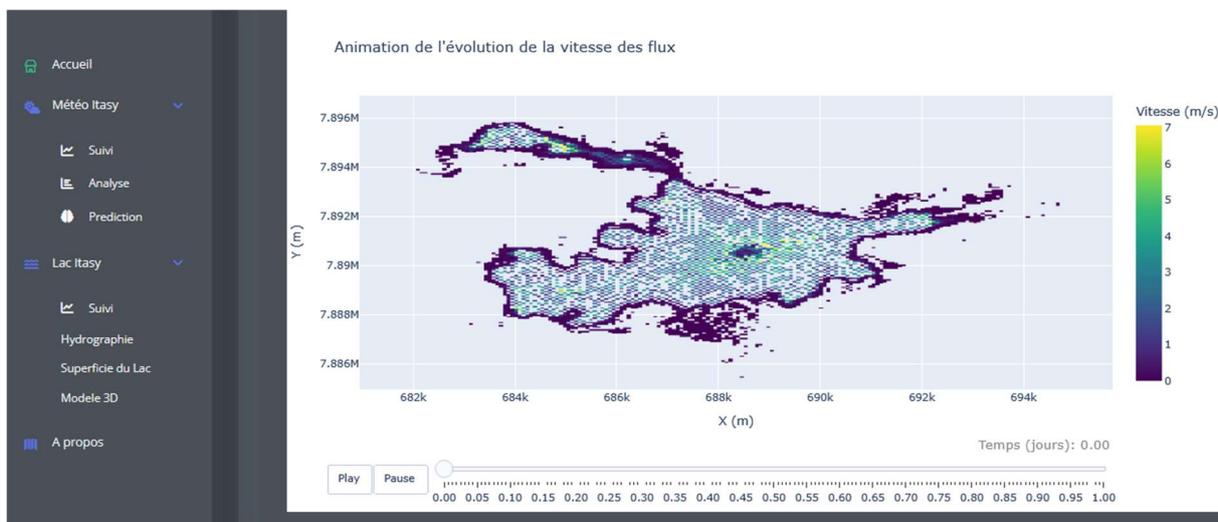


figure 25 Animation de l'évolution de la vitesse des flux

4. Perspectives

Notre étude actuelle repose sur des données de réanalyse (ERA5-Land) et sur des images satellitaires de moyenne résolution, ce qui a permis d'établir une base solide pour la compréhension des dynamiques du lac Itasy. Cependant, pour une analyse plus fine et des applications à haute valeur ajoutée, il est important d'envisager l'intégration de données commerciales à haute résolution.

Certaines constellations satellitaires commerciales offrent une revisite quotidienne et une résolution spatiale de quelques mètres, permettant de suivre presque en temps réel les variations de la surface du lac et l'évolution des zones inondables après des pluies

intenses. Cette surveillance constante faciliterait également la détection et la quantification rapide d'événements soudains, tels que glissements de terrain ou pollutions. De plus, la résolution améliorée de ces images serait un atout pour l'agriculture locale : autour du lac, où l'agriculture de subsistance est pratiquée sur de petites parcelles, il serait possible de surveiller avec précision la santé des cultures et de détecter les signes de stress hydrique, ce qui reste difficile avec les images de 10 mètres de résolution.

D'autres sources de données commerciales à très haute résolution, bien que non librement accessibles, permettent une cartographie extrêmement précise avec des résolutions allant jusqu'à moins d'un mètre. Cette finesse offre des applications de modélisation et de planification avancées autour du lac, permettant de cartographier avec exactitude les infrastructures critiques comme les barrages, ponts et routes, et d'évaluer leur vulnérabilité face aux événements climatiques extrêmes. Combinées à des données sur la profondeur de l'eau, ces images permettent de créer des modèles numériques de la surface du lac d'une précision inégalée, améliorant la modélisation des flux et de la dynamique hydrologique. Enfin, cette résolution favorise une micro-gestion des ressources en eau, en identifiant les sources de ruissellement, les petits cours d'eau invisibles par d'autres satellites et les zones d'érosion avec un niveau de détail exceptionnel.

5. CONCLUSION

La mise en place de cette plateforme de suivi hydro-climatique pour la région d'Itasy ne se limite pas à un projet technique ; elle constitue une réponse stratégique et essentielle face aux défis environnementaux et sociaux. En combinant les données de télédétection, la simulation numérique et l'observation de terrain, ce travail comble un manque critique de données fiables, transformant l'incertitude en connaissance. L'architecture de la plateforme, qui associe la couverture globale des données de réanalyse ERA5-Land et des images satellitaires à moyenne résolution à la précision des capteurs locaux, offre un aperçu inédit des dynamiques complexes, garantissant des informations à la fois globales et ancrées dans la réalité du terrain.

La plateforme se positionne comme un outil de gouvernance et de résilience climatique. Elle propose un ensemble de fonctionnalités allant de la consultation des prévisions météo pour les agriculteurs à une analyse historique détaillée pour les chercheurs. Ses capacités de modélisation prédictive, basées sur des algorithmes avancés tels que les réseaux de neurones, permettent d'anticiper les tendances futures, un atout majeur dans un contexte de changement climatique. Par ailleurs, la visualisation 3D des flux et l'analyse de la superficie du lac à partir des images satellitaires offrent une compréhension visuelle et intuitive des phénomènes hydrologiques. L'affinement du calcul de la surface du lac à l'aide des indices NDWI et NDVI assure que les décisions sont basées sur des données précises et fiables.

Les fondations posées par cette plateforme ouvrent la voie à des développements futurs à forte valeur ajoutée. Les évolutions les plus prometteuses concernent l'intégration de données satellitaires commerciales à haute résolution. Certaines sources offrent une revisite quotidienne et une résolution de quelques mètres, permettant un suivi quasi en temps réel des inondations et des variations de surface, tout en améliorant la surveillance agricole à l'échelle des petites parcelles. D'autres sources à très haute résolution, avec des détails de l'ordre de quelques dizaines de centimètres, pourraient transformer la cartographie des infrastructures et la micro-gestion des ressources en eau, en détectant des éléments imperceptibles aux autres satellites. L'intégration de ces données permettrait de révéler pleinement le potentiel de la plateforme, la positionnant comme un outil de planification et d'adaptation encore plus puissant pour la région d'Itasy.

REFERENCE

- [1] OIEau, Projet DECLIIC. 2019. « CONTRAT DE LAC ITASY – État des lieux. » P. 1-49.
- [2] FAO, World Bank. 2024. « MADAGASCAR - Country climate and development report ». Washington, D.C.
- [3] Vieilledent, G., et al. 2021. « Scénarios de la biodiversité sous l'effet conjoint du changement climatique et de la déforestation à Madagascar. » *Rapport final du projet BioSceneMada*. P. 1-104.
- [4] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2022. « Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. » Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. P. 1-3056.

- [5] Niger Basin Authority. « Hydrological Satellite-Based Project (SATH) in the Niger Basin»
- [6] Sansa-Otim, J. « Improving Weather Information Management in East Africa through ICTs (WIMEA-ICT) Project ».
- [7] Centre de Recherches, d'Études et d'Appui à l'analyse Économique à Madagascar. 2013. « *Monographique de la Région Itasy. Antananarivo, Madagascar.* ». P. 03-15.
- [8] Cellule Technique de Coordination du Programme National de Gestion des Risques et des Catastrophes (CTC-PNGRC). « Contrat de Lac Itasy – État des lieux ». Ministère de l'Eau, de l'Assainissement et de l'Hygiène, 2018.
- [9] Pierre Bonnet. « *Chapitre 2 : Caractéristiques météorologiques des capteurs* ». In *Capteurs – Chaînes de mesures*. Master GSI, Université de Poitiers, 2011
- [11] Wetzel, R. G. 2001. « *Limnology: Lake and River Ecosystems.* » 3rd Edition. Academic Press. P. 1-1006.
- [12] Yan, H., & Shugart, H. H. (2010). « *An air relative-humidity-based evapotranspiration model from eddy covariance data* », *Agricultural and Forest Meteorology*, 150(7–8), 1059–1067.
- [13] Klaus, M., & Vachon, D. (2020). « *Challenges of predicting gas transfer velocity from wind measurements over global lakes* », *Aquatic Sciences*, 82(53)
- [14] FAO. (1998). « *Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements* », FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- [15] EDDI M. 1980. « *Modélisation de l'évolution thermique d'un lac de barrage : Application au lac du Pareloup* ». Thèse 3ème cycle. Université des Sciences et Techniques du Languedoc. Montpellier. P. 177.
- [16] Durand, M. (2021). « *Diffuse solar radiation and canopy photosynthesis in a temperate forest.* », *Agricultural and Forest Meteorology*, 308, 108474.
- [17] Aminot et Kérouel. 2004. « *Hydrologie des écosystèmes marins Paramètres et analyses.* ». Partie 2, Chapitre III, Paragraphe 3.
- [18] DCE Réunion "*Physico-Chimie & Phytoplankton*". Fascicule technique pour la mise en œuvre du suivi "*Physico-Chimie & Phytoplankton*" du réseau de contrôle de surveillance DCE à La Réunion : Réseau Hydrologique du Littoral Réunionnais.
- [19] Devillers J, Squilbin M, Yourassowsky C. 2005. « *Qualité physico-chimique et chimique des eaux de surface.* ». Institut Bruxellois pour la Gestion de l'Environnement. P. 1- 4.
- [20] Rodier J., Bazin C, Boutin J-P, Chambon P, Champsaur H, Rodi L. 1996. « *L'analyse de l'eau : Eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer.*». 8ème édition. Dunod, Paris, France. P. 879-1260.
- [21] 2004. « *Conductivity Theory and Practice.* ». Radiometer Analytical SAS, France. P. 6, 16- 19.
- [22] BLIEFFERT C., PERRAUD R. .2001. « *Chimie de l'environnement– air, eau, sols, déchets.* ». DeBoeck Université.
- [23] RALIJAONA H. Tafita., RANDRIANJA M. Miangaly. « HYBRID LSTM-RNN AND SARIMA MODELING FOR TIME SERIES TEMPERATURE PREDICTION: THE CASE OF ANTANANARIVO, MADAGASCAR » *International Journal of Progressive Sciences and Technologies (IJPSAT)*, ISSN: 2509-0119, Vol. 50 No. 1 April 2025, pp. 69-96
- [24] RALIJAONA Herilala Tafitasoloniaina, & RANDRIANJA Malanto Miangaly. (2025). « *HYDRODYNAMICS OF LAKE ITASY: OPTIMIZING A NUMERICAL MODEL FOR STABILITY AND MASS CONSERVATION USING ADAPTIVE COURANT-FRIEDRICHS-LEWY CRITERION.* » *Revue Internationale De La Recherche Scientifique (Revue-IRS)*, 3(4), 3456–3477.