



Interreg
France – Suisse



Cofinancé par
l'Union Européenne

Vers un système opérationnel de surveillance et de prévision des blooms de phytoplancton pour le Léman

Frédéric SOULIGNAC¹, Orlane ANNEVILLE¹, Jonathan DEROT², Thibault MALOU¹, Alexandre MAYER¹, Sayoob VADAKKE-CHANAT¹, Stéphan JACQUET¹

¹UMR CARRETEL, INRAE, Université Savoie-Mont Blanc, Thonon-les-Bains, France

²Advanced Institute for Marine Ecosystem Change (WPI-AIMEC), Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), Yokohama, Japan



INRAE



Interreg
Alpine Space



Co-funded by
the European Union

DiMark

Sommaire de la présentation

- Contexte et objectifs
- Présentation générale de l'outil (développé à partir des données 2016-2024)
- Utilisation et résultats en 2025
- Enseignements tirés de la mise en application en 2026
- Limites, critiques et perspectives

Sommaire de la présentation

- Contexte et objectifs
- Présentation générale de l'outil (développé à partir des données 2016-2024)
- Utilisation et résultats en 2025
- Enseignements tirés de la mise en application en 2026
- Limites, critiques et perspectives

Projet ALGA

- Objet : Blooms algaux dans le Léman dans un contexte de changement global
- Durée du projet : 3 ans (2024-2026)
- 14 partenaires : UMR CARRTEL (INRAE-USMB), UNIGE, OFEV, GE, VD, ASL, CentraleSupélec, CIPEL, EAWAG, EPFL, GEM, LEESU, SCIMABIO Interface, Service de l'eau de la ville de Lausanne
- 4 volets :
 - WP1 : Compréhension générale et connaissances locales
 - WP2 : Impacts des blooms de phytoplancton sur la qualité de l'eau et les services écosystémiques
 - Une revue systématique à l'échelle mondiale ([Soulignac et al., 2025](#))
 - Un outil surveillance et de prévision des blooms de phytoplancton dans le lac Léman ([Soulignac et al., 2026](#))
 - WP3 : Perception
 - WP4 : Gestion et gouvernance

Contexte

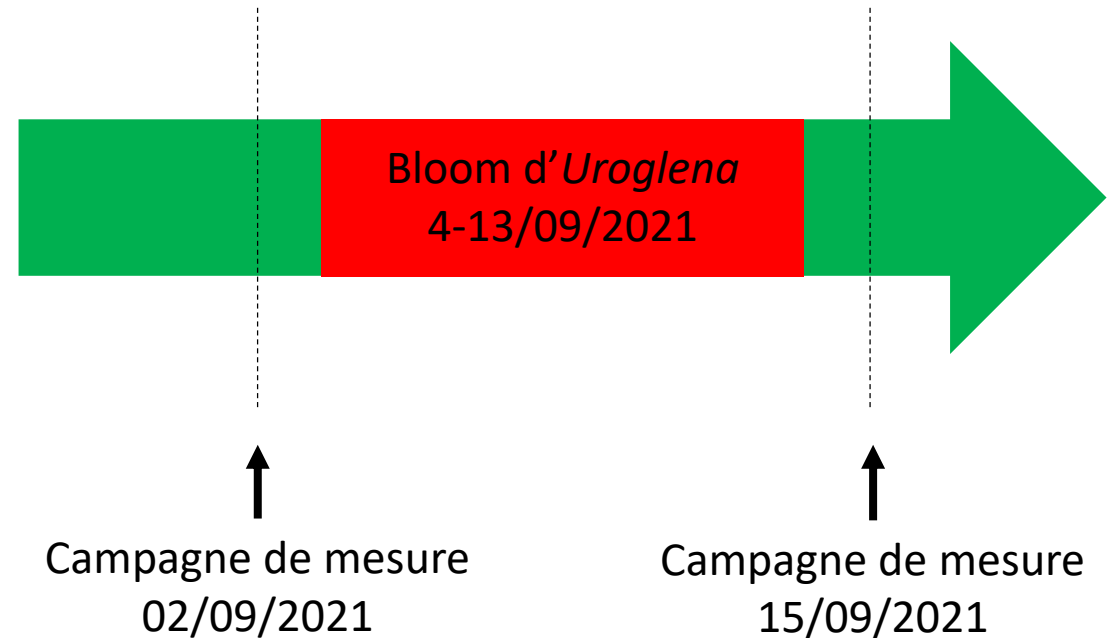
- Persistance de blooms impactant malgré l'amélioration de l'état trophique du Léman 🚫



Photo prise pendant le bloom d'*Uroglена* en 2021
(Communes de Saint-Gingolph)

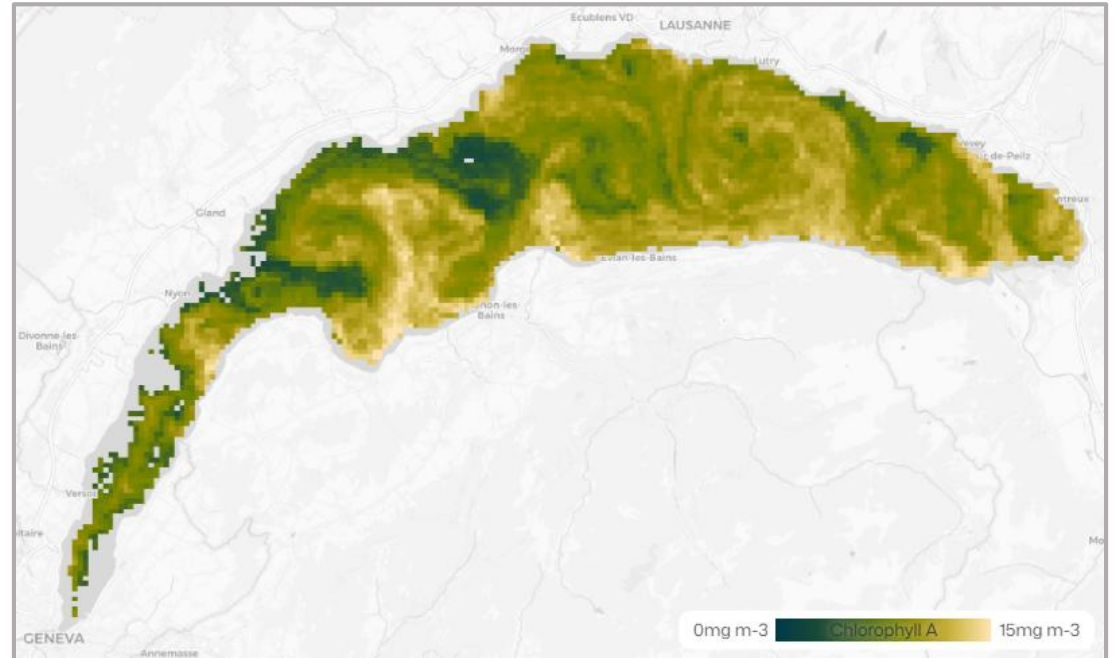
Contexte

- Persistance de blooms impactant malgré l'amélioration de l'état trophique du Léman 
- Le suivi SHL2 pourrait ne pas détecter certains blooms



Contexte

- Persistance de blooms impactant malgré l'amélioration de l'état trophique du Léman 
- Le suivi SHL2 pourrait ne pas détecter certains blooms
- L'imagerie satellite permet de localiser les blooms en surface



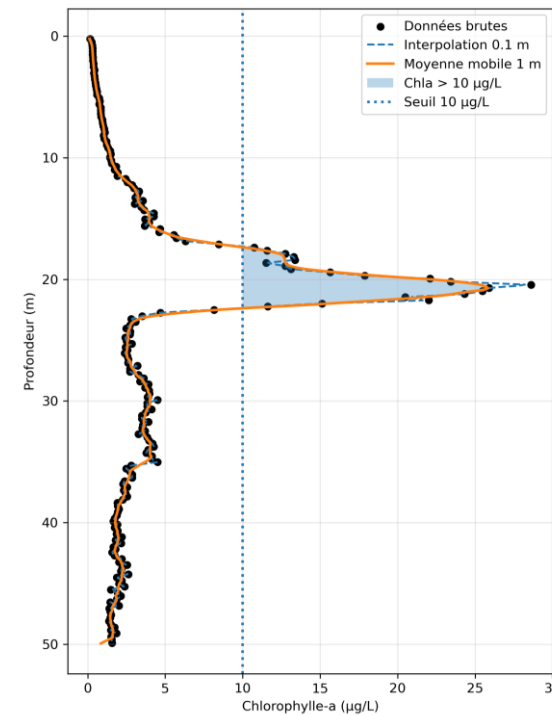
Carte de [Chl-a] pendant le bloom d'*Uroglena* en 2021
06/09/2021 (Alplakes)

Contexte

30/06/2020

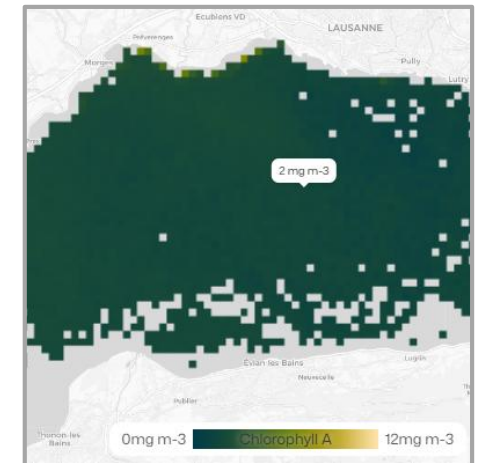
- Persistance de blooms impactant malgré l'amélioration de l'état trophique du Léman 
- Le suivi SHL2 pourrait ne pas détecter certains blooms
- L'imagerie satellite permet de localiser les blooms en surface
- L'imagerie satellite ne détecte pas les concentrations élevées en Chl-a en profondeur

$\max([\text{Chl-a}]_{\text{in situ, SHL2}}) > 25 \mu\text{g/L}$



Profil SHL2 (SI-OLA)

$[\text{Chl-a}]_{\text{satellite, SHL2}} = 2 \mu\text{g/L}$



Données satellite (Alplakes)

Objectif et questions

- Objectif : Etudier la faisabilité d'un outil permettant d'évaluer les blooms de phytoplancton dans le Léman

Objectif et questions

- Objectif : Etudier la faisabilité d'un outil permettant d'évaluer les blooms de phytoplancton dans le Léman
- 3 questions :
 - Comment localiser les blooms en surface en utilisant l'imagerie satellite ?
 - Peut-on prédire le dynamique spatio-temporel des blooms en surface à court terme ?
 - Peut-on détecter des concentrations élevées en Chl-a en profondeur (que l'imagerie satellite ne parvient pas à détecter) ? (projet DiMark)

Sommaire de la présentation

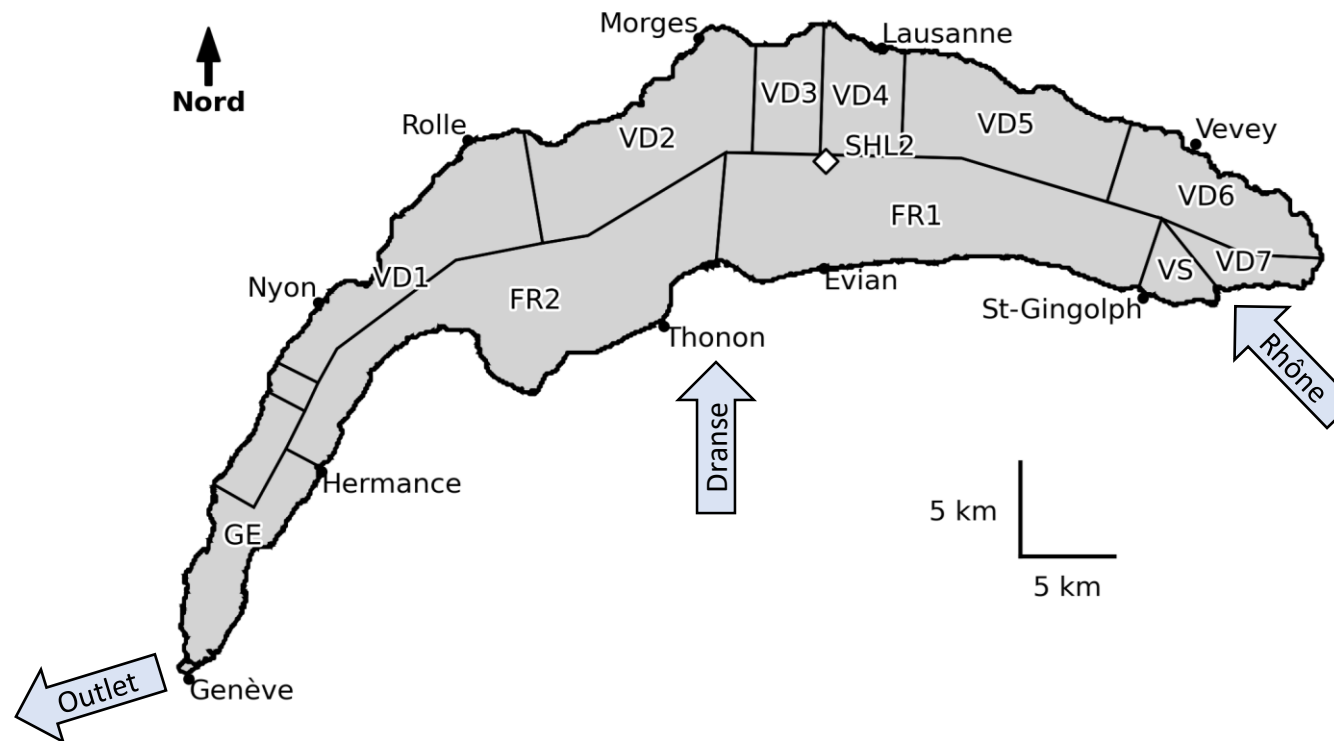
- Contexte et objectifs
- **Présentation générale de l'outil (développé à partir des données 2016-2024)**
- Utilisation et résultats en 2025
- Enseignements tirés de la mise en application en 2026
- Limites, critiques et perspectives

Sommaire de la présentation

- Contexte et objectifs
- Présentation générale de l'outil (développé à partir des données 2016-2024) :
 - Module n°1 : Localisation des blooms en surface par satellite
- Utilisation et résultats en 2025
- Enseignements tirés de la mise en application en 2026
- Limites, critiques et perspectives

Localisation des blooms en surface par satellite

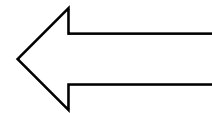
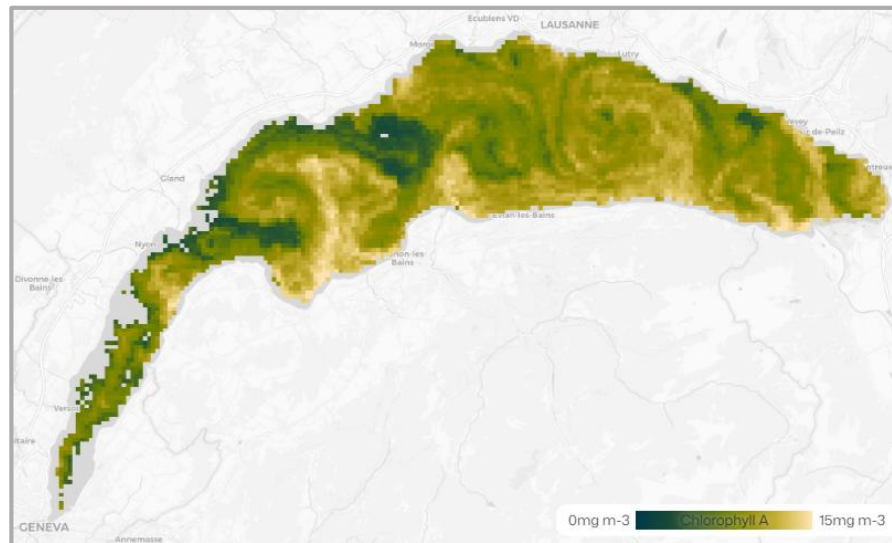
- Evaluation quotidienne réalisée dans chacun des 11 secteurs administratifs



Localisation des blooms en surface par satellite

- Evaluation quotidienne réalisée dans chacun des 11 secteurs administratifs
- Évaluation réalisée le jour J0 à partir des cartes de [Chl-a] Alplakes du jour J-1

Jour J-1 (données utilisées pour l'évaluation)

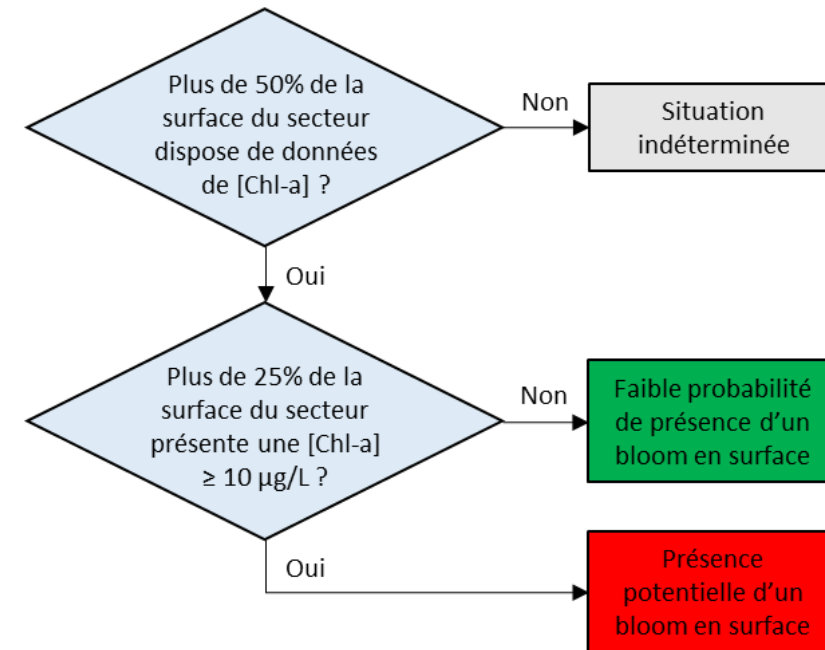


Jour J0 (jour de l'évaluation)

Localisation des blooms en surface par satellite

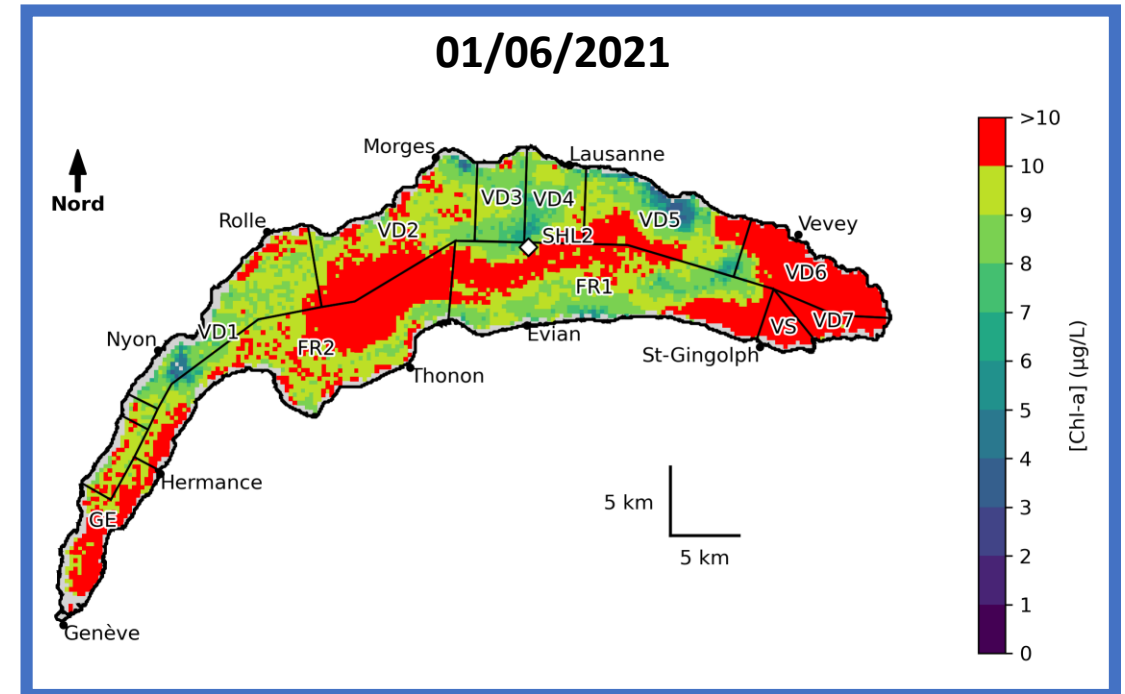
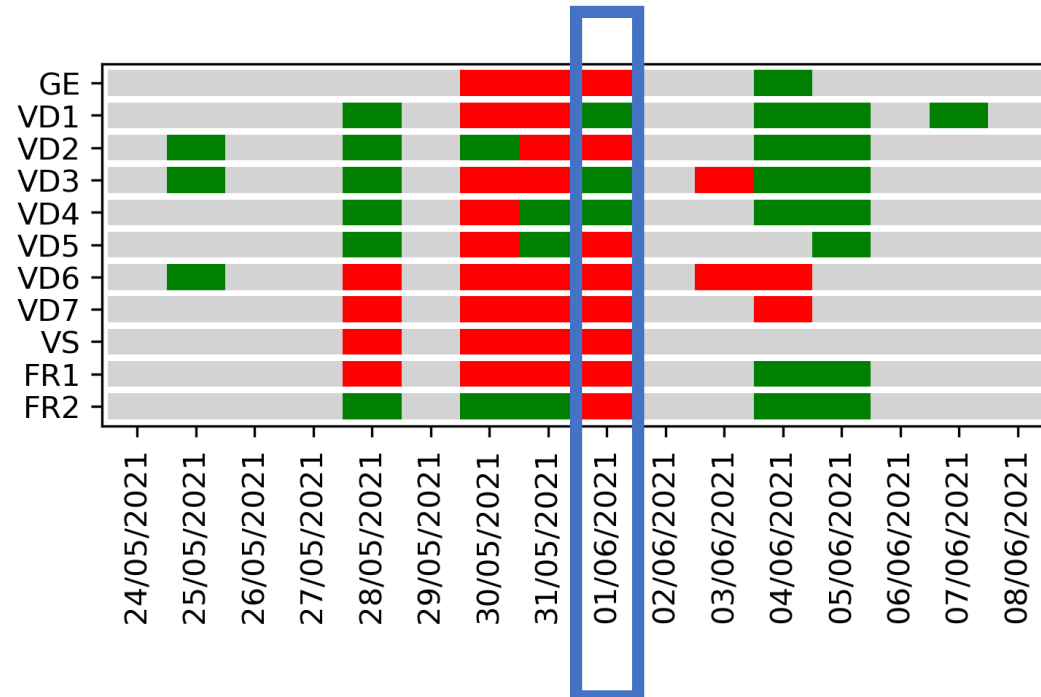
- Evaluation quotidienne réalisée dans chacun des 11 secteurs administratifs
- Évaluation réalisée le jour J0 à partir des cartes de [Chl-a] Alplakes du jour J-1
- Choix des valeurs des seuils :

Seuil	Valeur
Couverture minimale pour l'évaluation d'un secteur	50% du secteur
Couverture minimale qui dépasse le seuil de [Chl-a] pour qu'un présence potentielle d'un bloom en surface soit émise dans un secteur	25% du secteur
[Chl-a]	10 µg/L



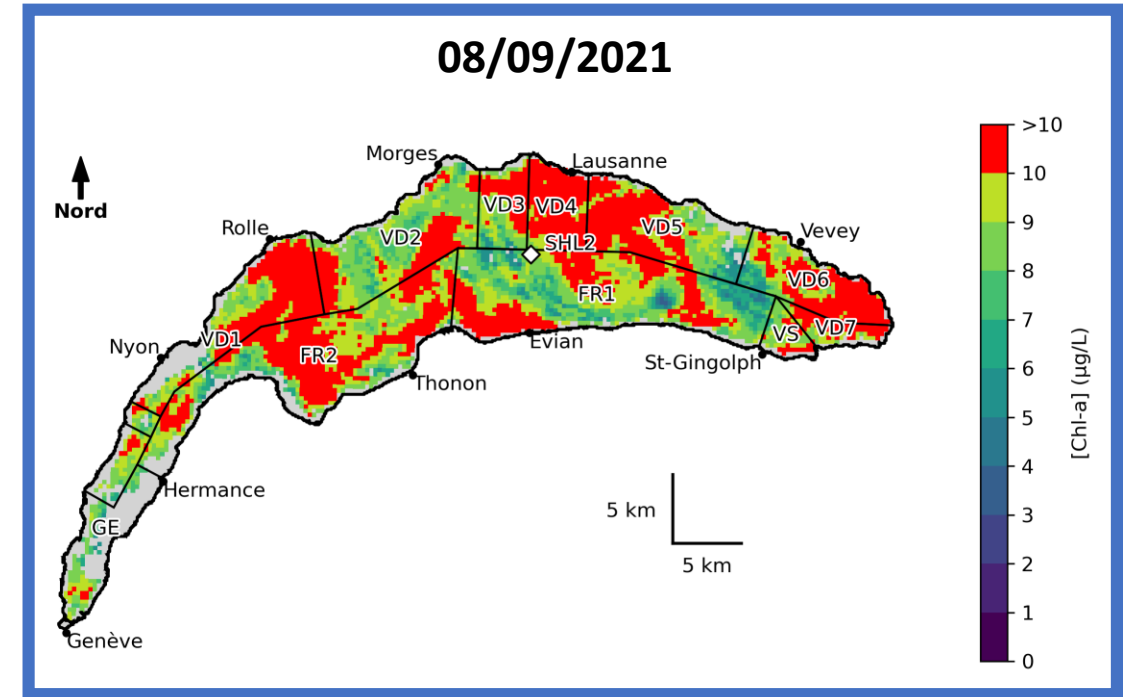
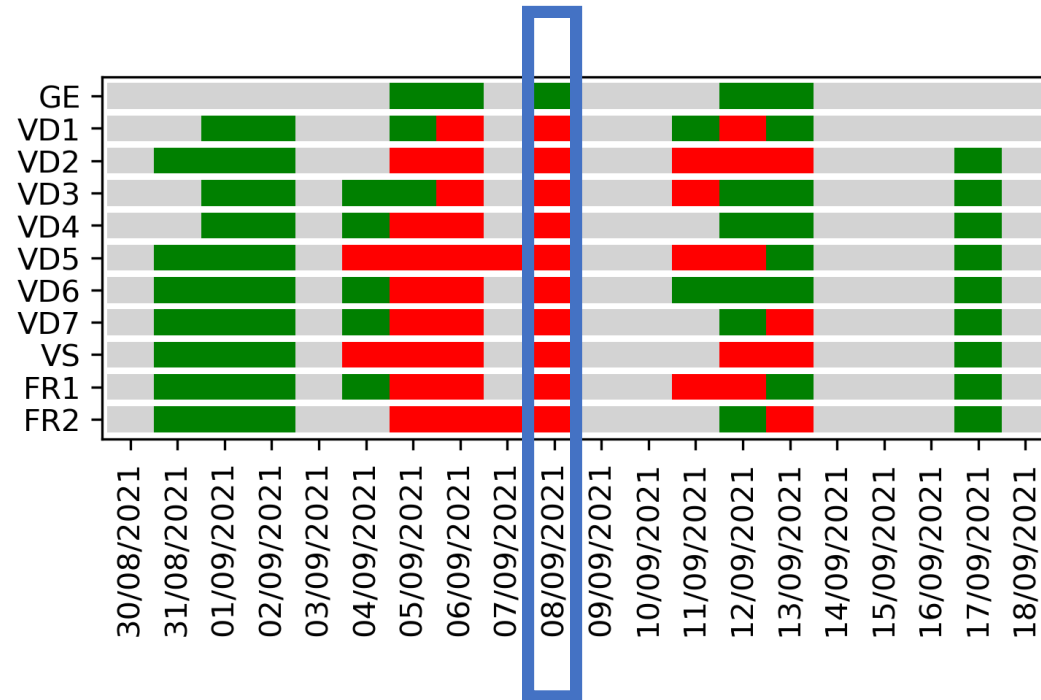
Localisation des blooms en surface par satellite

- Présence potentielle d'un bloom en surface en mai/juin 2021 (non documenté)



Localisation des blooms en surface par satellite

- Présence potentielle d'un bloom en surface en mai/juin 2021 (non documenté)
- Bloom d'*Uroglena* de septembre 2021



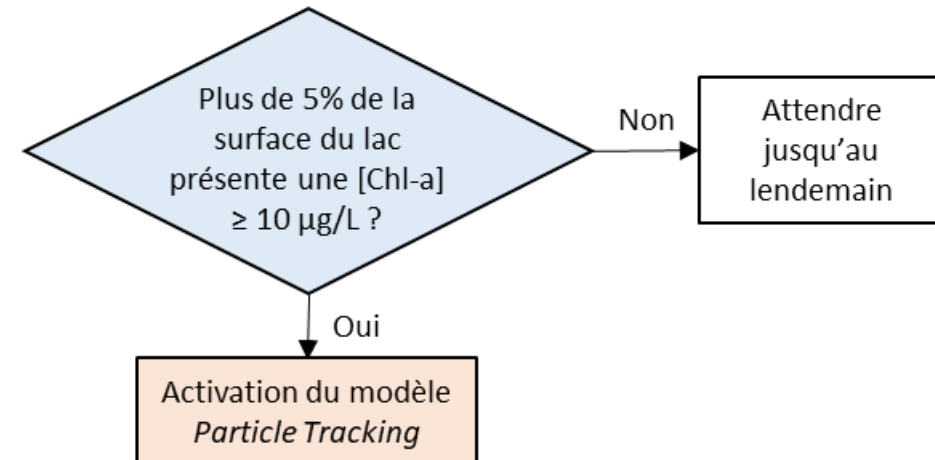
Sommaire de la présentation

- Contexte et objectifs
- **Présentation générale de l'outil (développé à partir des données 2016-2024) :**
 - Module n°1 : Localisation des blooms en surface par satellite
 - Module n°2 : Dynamique spatiotemporel des blooms en surface détectés par satellite
- Utilisation et résultats en 2025
- Enseignements tirés de la mise en application en 2026
- Limites, critiques et perspectives

Dynamique spatiotemporel des blooms en surface

- Choix des valeurs des seuils :

Seuil	Valeur
Couverture minimale qui dépasse le seuil de [Chl-a] pour que le modèle de suivi des particules soit activé	5% du lac



Dynamique spatiotemporel des blooms en surface

- Choix des valeurs des seuils
- Modèle de suivi des particules :
 - Initialisation des positions de particules aux coordonnées (x, y) correspondant aux pixels satellitaires où $[\text{Chl-a}]_{\text{satellite}} \geq 10 \mu\text{g/L}$, dans la couche d'eau visible par satellite :

$$Z_{pd} = \frac{1}{K_d} = \frac{\text{Secchi}}{1,7}$$

- Simulation des trajectoires des particules jusqu'au jour J+3 :

$$x(z, t + \Delta t) = x(z, t) + \underbrace{u(z, t)\Delta t}_{\text{Advection}} + \underbrace{\xi_x \sqrt{2D\Delta t}}_{\text{Diffusion}}$$

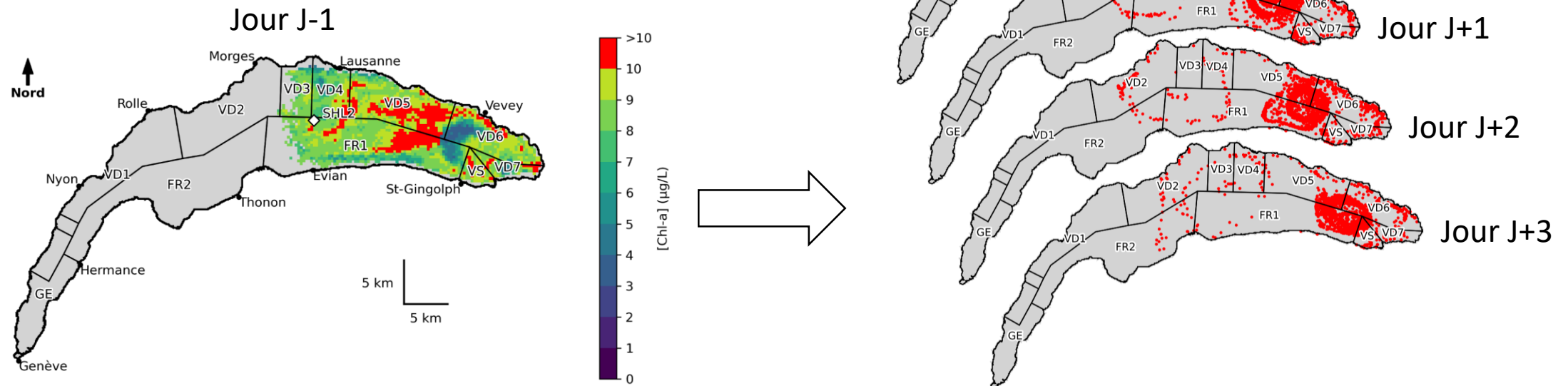
$$y(z, t + \Delta t) = y(z, t) + \underbrace{v(z, t)\Delta t}_{\text{Advection}} + \underbrace{\xi_y \sqrt{2D\Delta t}}_{\text{Diffusion}}$$

Advection
(prévision hydrodynamiques,
Alplakes)

Diffusion

Dynamique spatiotemporel des blooms en surface

- Choix des valeurs des seuils
- Modèle de suivi des particules
- Exemple de résultat de simulation :



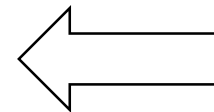
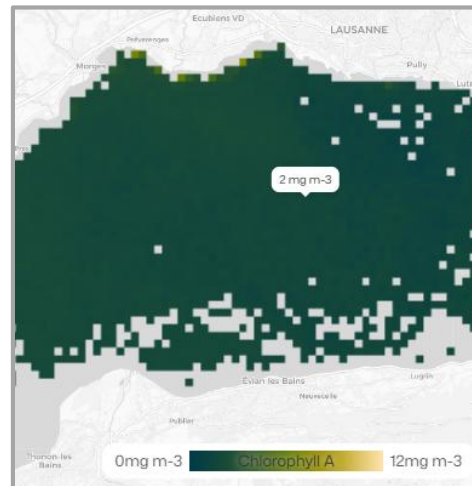
Sommaire de la présentation

- Contexte et objectifs
- **Présentation générale de l'outil (développé à partir des données 2016-2024) :**
 - Module n°1 : Localisation des blooms en surface par satellite
 - Module n°2 : Dynamique spatiotemporel des blooms en surface détectés par satellite
 - **Module n°3 : Détection des blooms en profondeur (que l'imagerie satellite ne détecte pas) (projet DiMark)**
- Utilisation et résultats en 2025
- Enseignements tirés de la mise en application en 2026
- Limites, critiques et perspectives

Détection des blooms en profondeur

- Évaluation réalisée au point SHL2 le jour J0 à partir des cartes de [Chl-a] Alplakes du jour J-1, si $[\text{Chl-a}]_{\text{satellite,SHL2}} < 10 \mu\text{g/L}$

Jour J-1 (données utilisées pour l'évaluation)



Jour J0 (jour de l'évaluation)

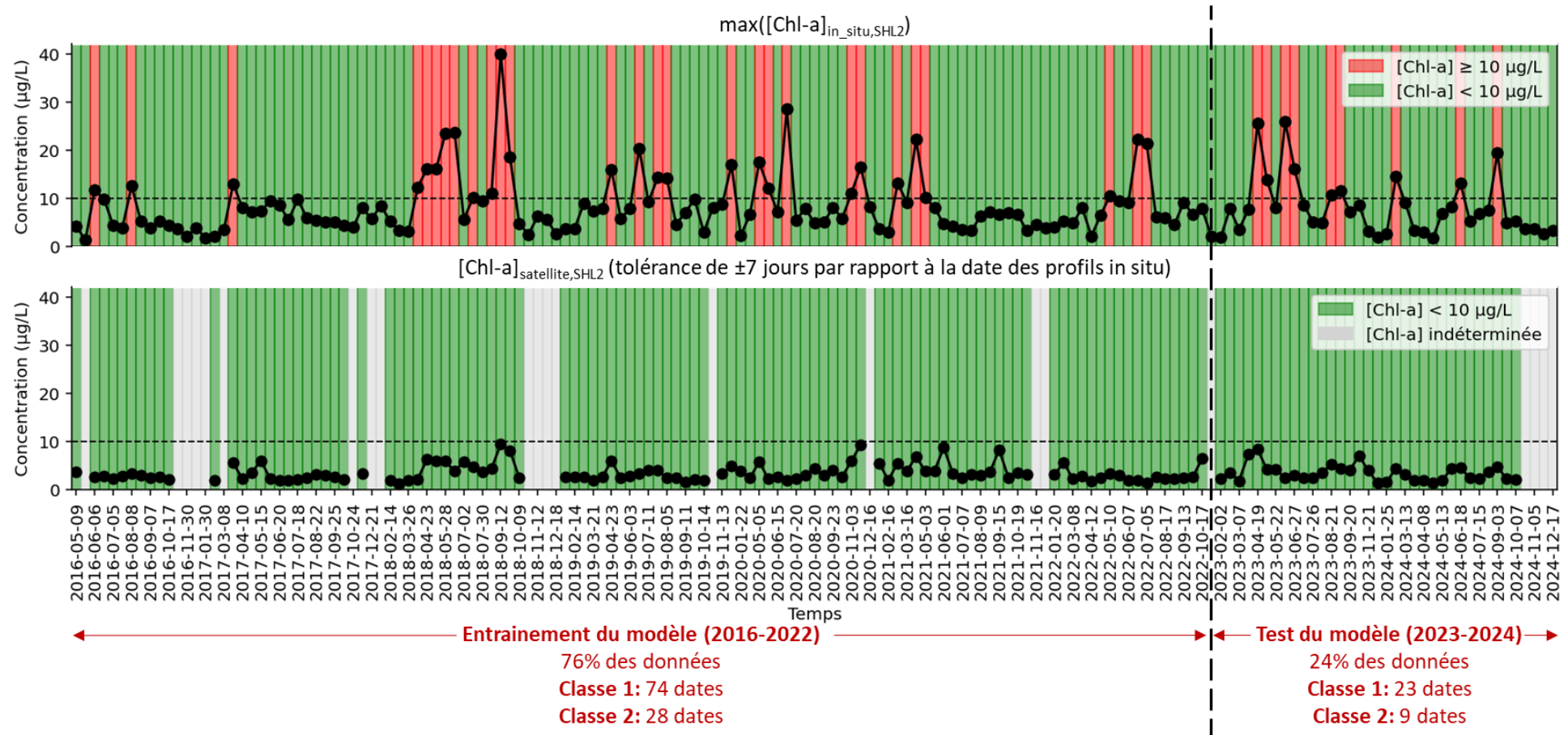
Exemple de condition favorable à l'évaluation :

30/06/2020 : $[\text{Chl-a}]_{\text{satellite,SHL2}} = 2 \mu\text{g/L}$

Détection des blooms en profondeur

- Évaluation réalisée au point SHL2 le jour J0 à partir des cartes de [Chl-a] Alplakes du jour J-1, si $[\text{Chl-a}]_{\text{satellite,SHL2}} < 10 \mu\text{g/L}$
- Modèle Random Forest :
 - Prédiction de 2 classes :
 - Classe 1 : $\forall z \in [0, z_{\text{max}}], [\text{Chl-a}]_{\text{in situ,SHL2}}(z) < 10 \mu\text{g/L}$
 - Classe 2 : $\exists z \in [0, z_{\text{max}}], [\text{Chl-a}]_{\text{in situ,SHL2}}(z) \geq 10 \mu\text{g/L}$
 - Prédiction réalisée à partir de 9 variables, incluant la transparence de l'eau, la stratification thermique et la saisonnalité

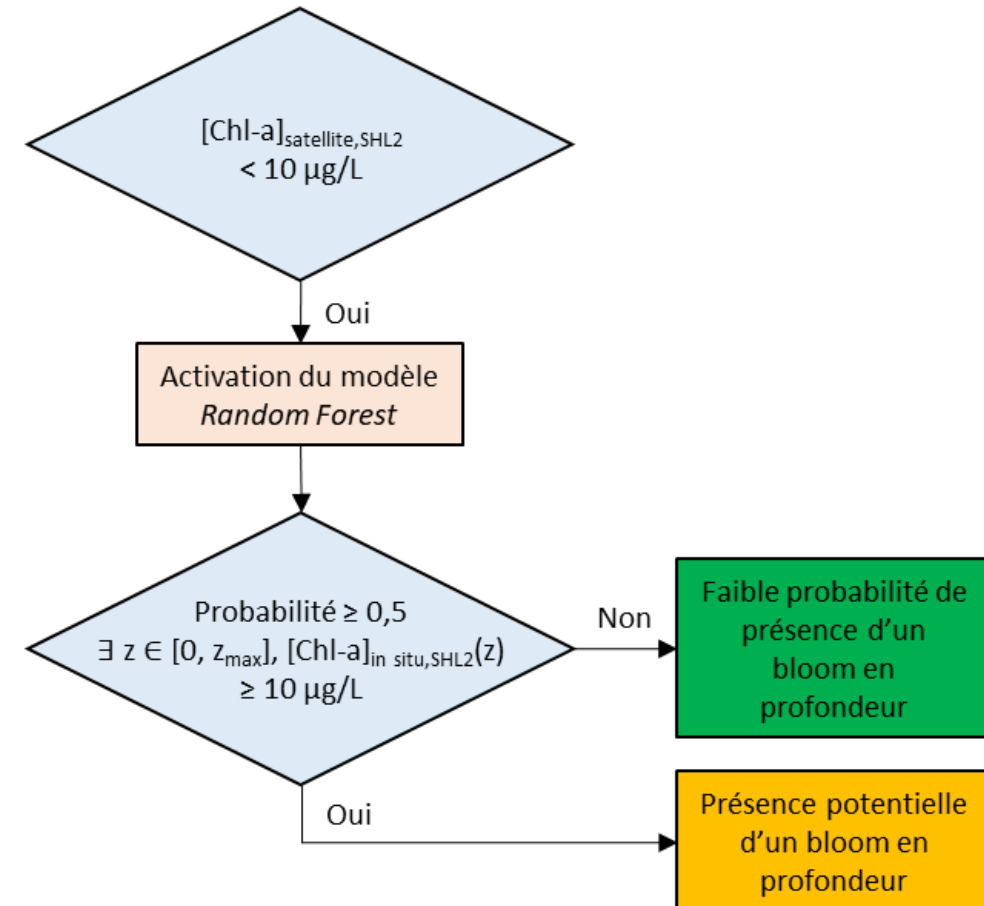
Définition des classes



Détection des blooms en profondeur

- Évaluation réalisée au point SHL2 le jour J0 à partir des cartes de [Chl-a] Alplakes du jour J-1, si $[\text{Chl-a}]_{\text{satellite,SHL2}} < 10 \mu\text{g/L}$
- Modèle Random Forest
- Choix des valeurs des seuils :

Seuil	Valeur
Probabilité minimale pour qu'une présence potentielle d'un bloom en profondeur soit émise	0,5



Sommaire de la présentation

- Contexte et objectifs
- Présentation générale de l'outil (développé à partir des données de 2016 à 2024)
- **Utilisation et résultats en 2025**
- Enseignements tirés de la mise en application en 2026
- Limites, critiques et perspectives

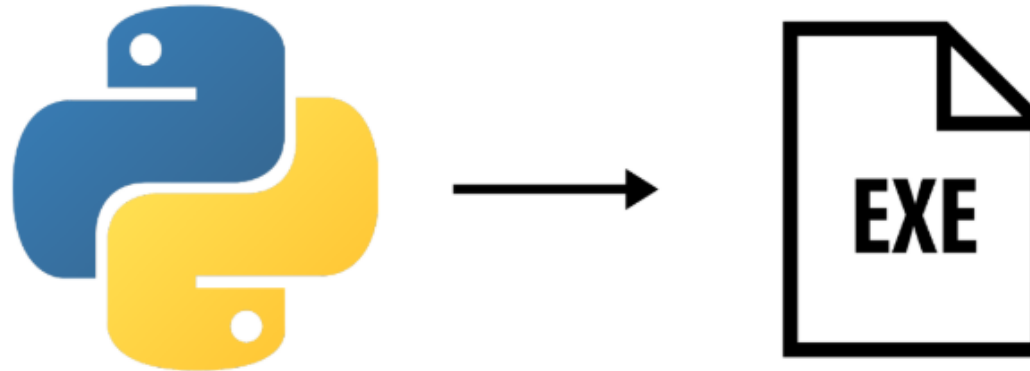
2 moyens d'utiliser l'outil

- Script Python



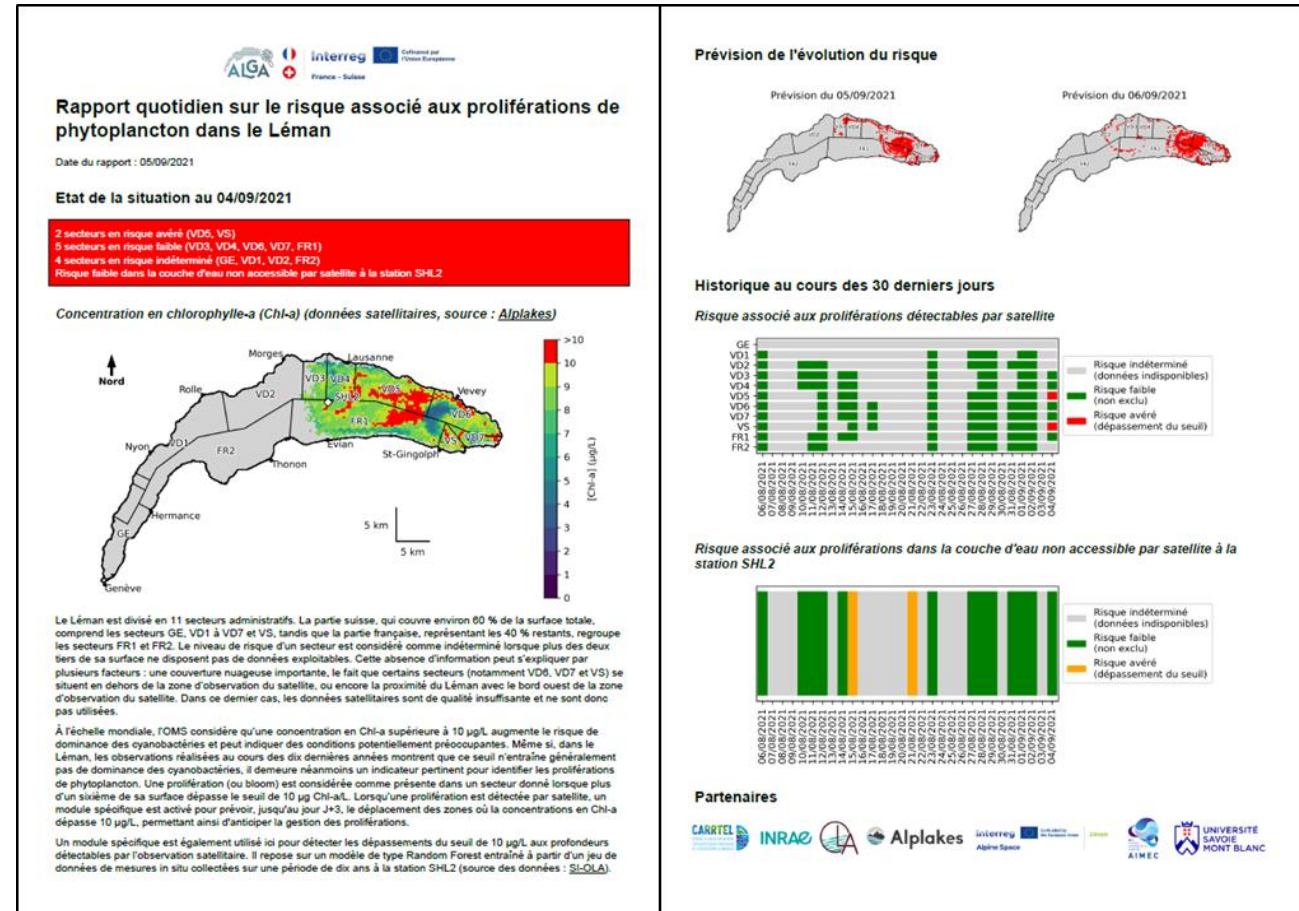
2 moyens d'utiliser l'outil

- Script Python
- Fichier exécutable Windows (pas besoin d'installer Python)



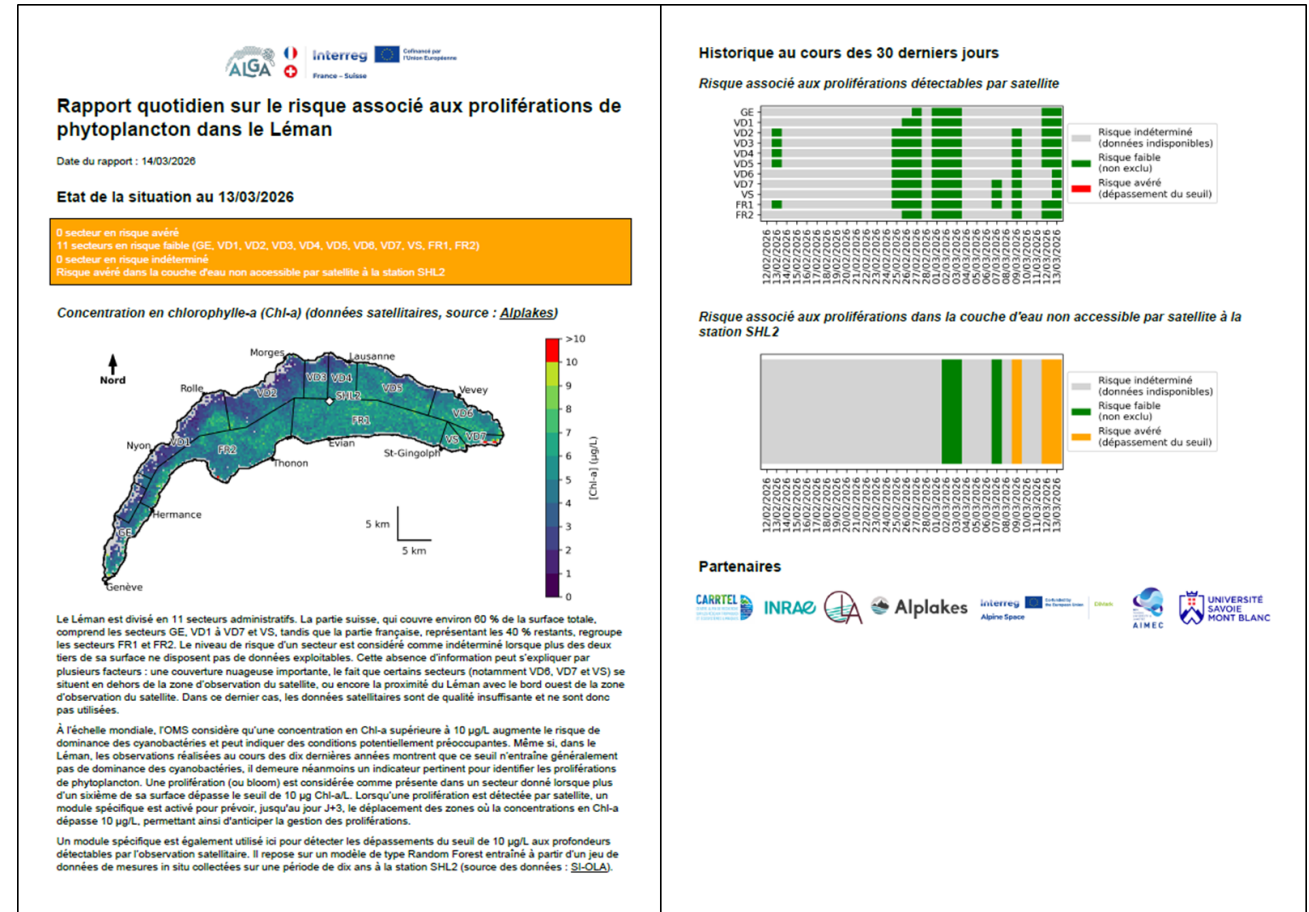
Un rapport comportant 4 niveaux de vigilance

- Présence potentielle d'un bloom en surface détecté par satellite



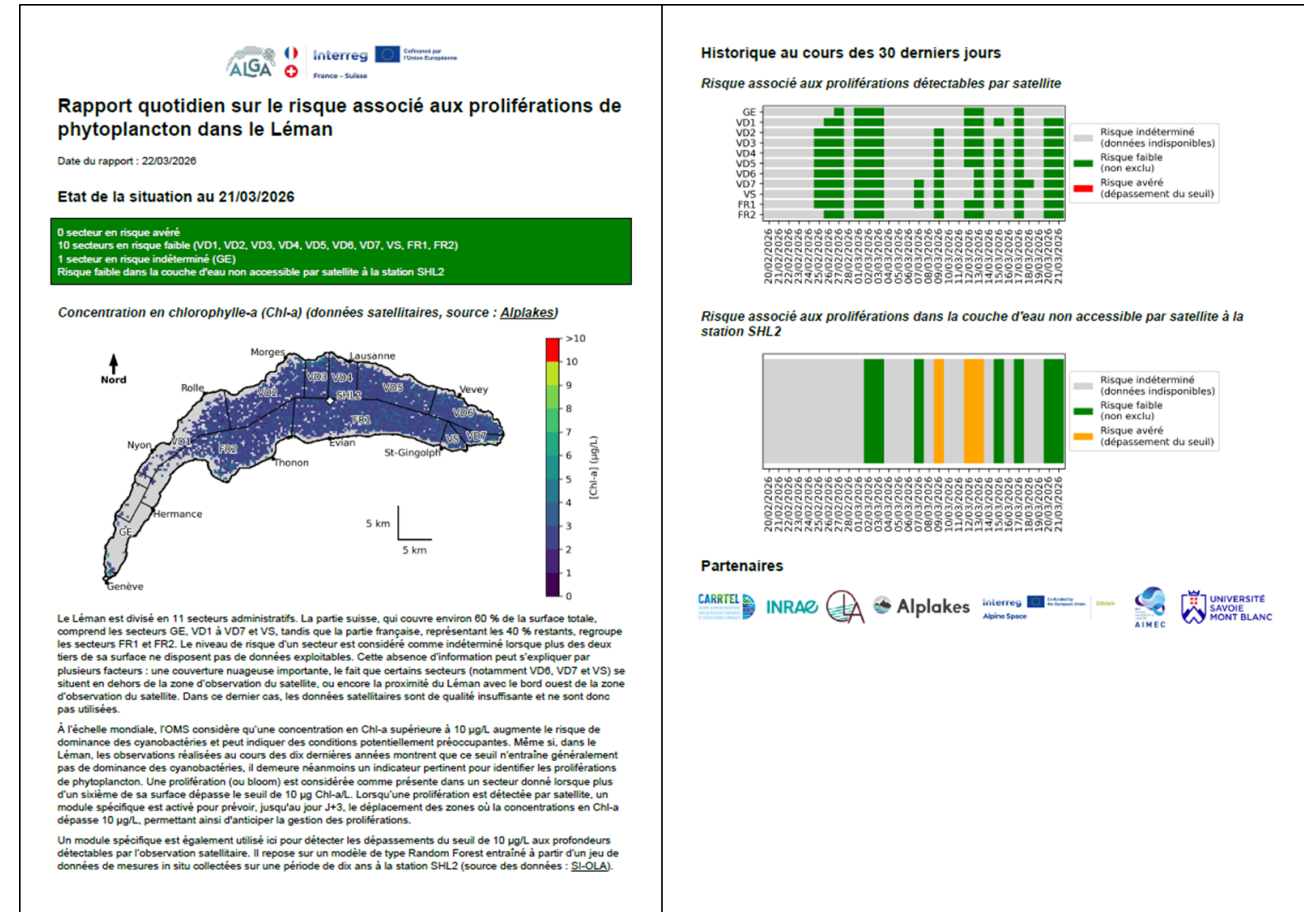
Un rapport comportant 4 niveaux de vigilance

- Présence potentielle d'un bloom en surface détecté par satellite
- Présence potentielle d'un bloom en profondeur à SHL2 non détecté par satellite



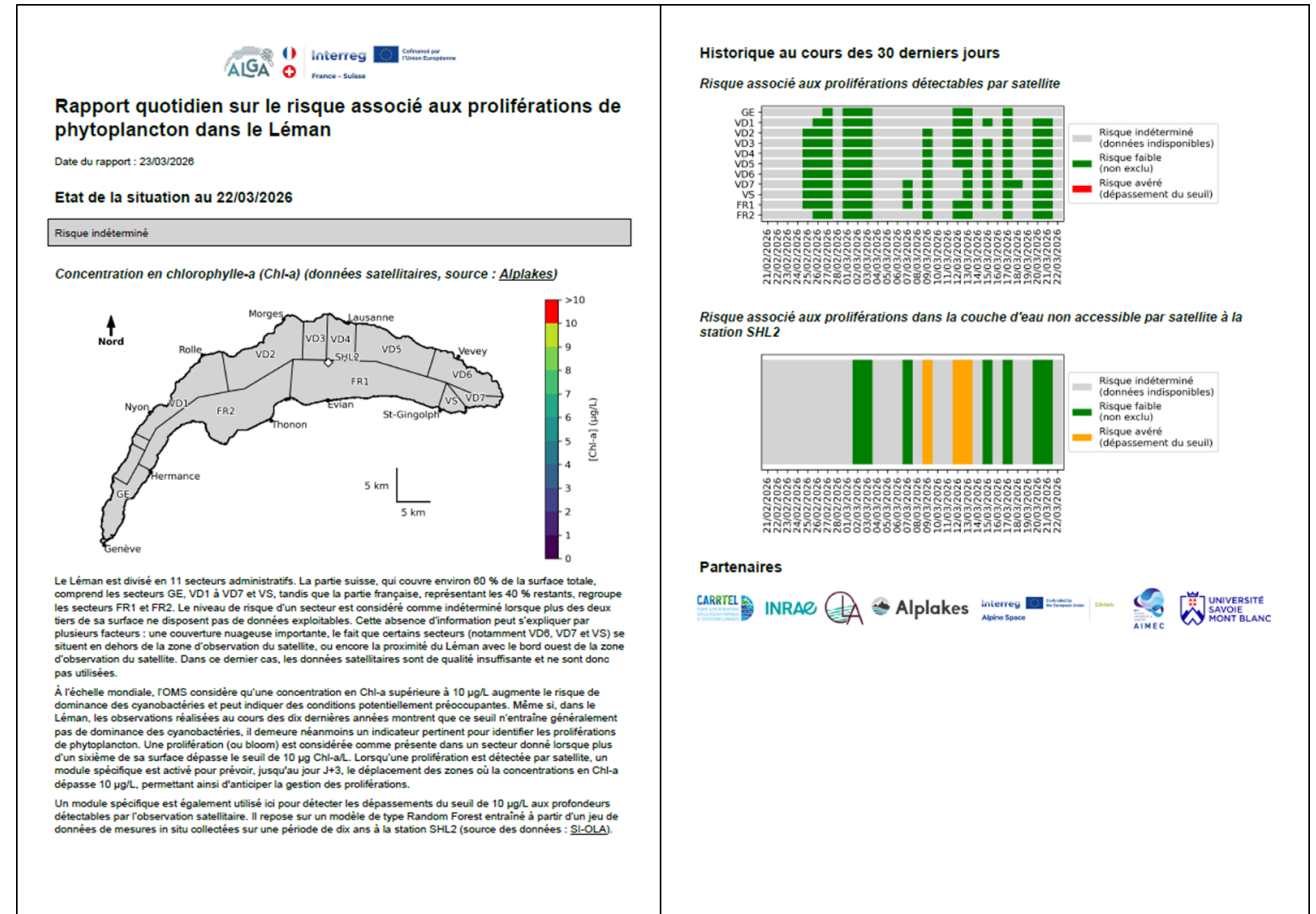
Un rapport comportant 4 niveaux de vigilance

- Présence potentielle d'un bloom en surface détecté par satellite
- Présence potentielle d'un bloom en profondeur à SHL2 non détecté par satellite
- Faible probabilité de bloom

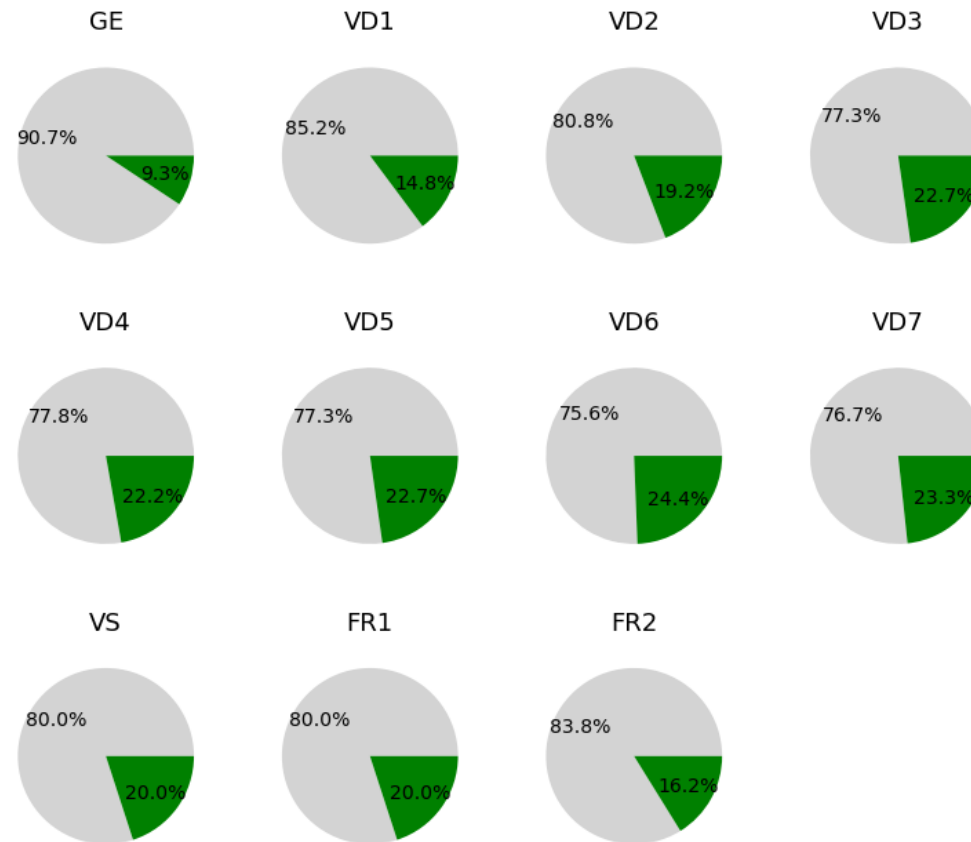
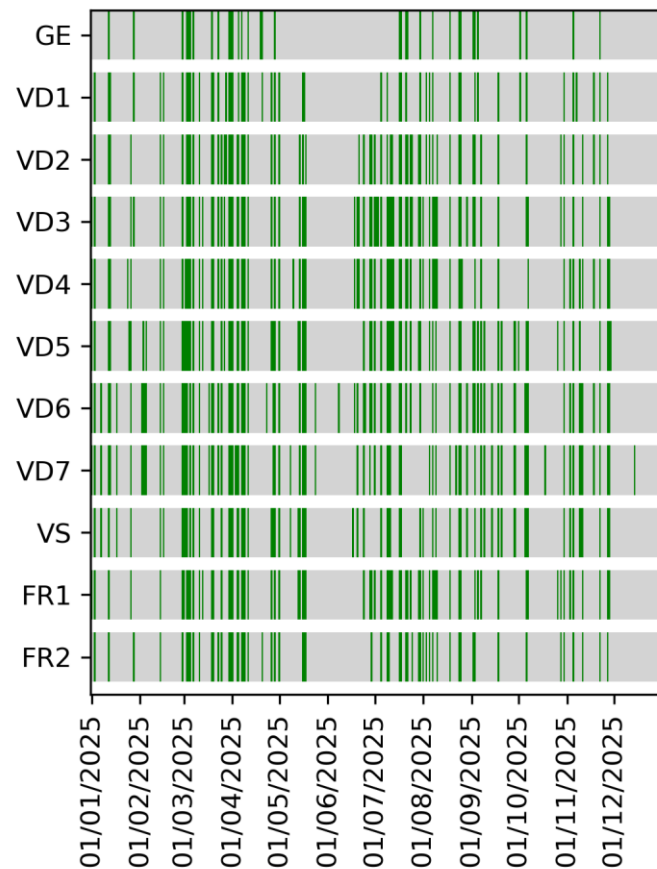


Un rapport comportant 4 niveaux de vigilance

- Présence potentielle d'un bloom en surface détecté par satellite
- Présence potentielle d'un bloom en profondeur à SHL2 non détecté par satellite
- Faible probabilité de bloom
- Situation indéterminée



Détection des blooms par satellite en 2025

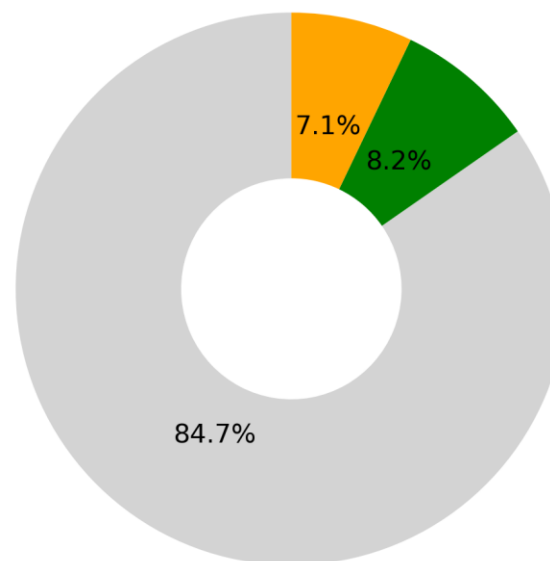
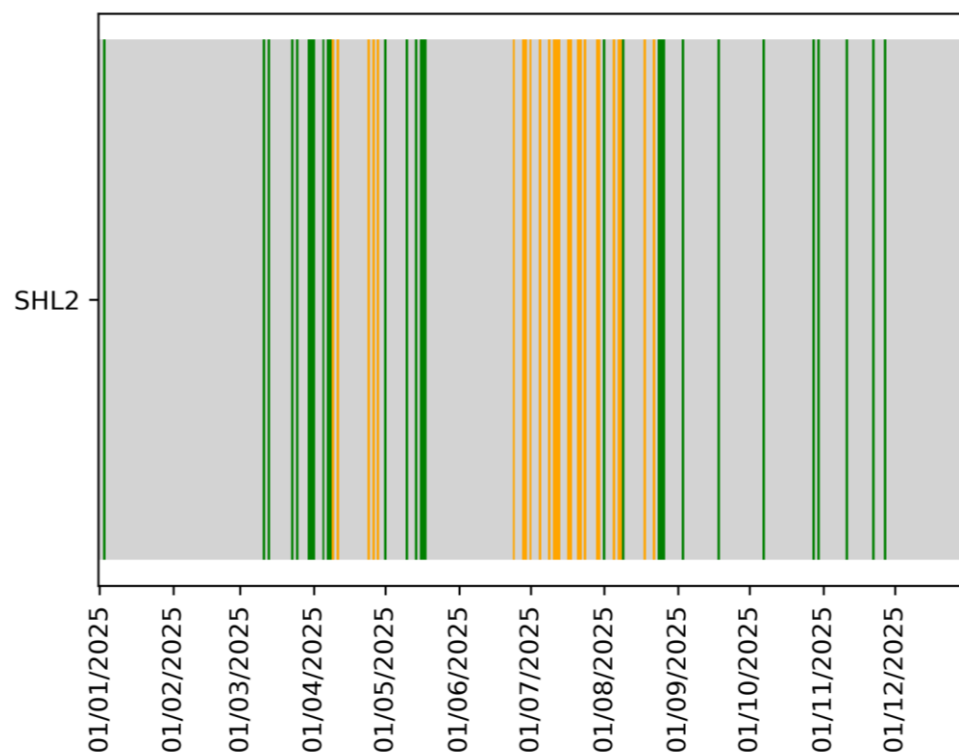


Faible probabilité d'un bloom en surface détecté par satellite

Situation indéterminée

Détection des blooms en profondeur en 2025

Résultats du modèle Random Forest



Présence potentielle d'un bloom en profondeur non détecté par satellite

Faible probabilité d'un bloom en profondeur non détecté par satellite

Situation indéterminée

Détection des blooms en profondeur en 2025

Campagne	Date	Observation au point SHL2	Résultat de prédiction du modèle Random forest
1	21/01/2025	[Chl-a] < 10 µg/L	Situation indéterminée (la colonne d'eau n'est pas encore stratifiée)
2	13/02/2025	[Chl-a] < 10 µg/L	Situation indéterminée (la colonne d'eau n'est pas encore stratifiée)
3	04/03/2025	[Chl-a] < 10 µg/L	Faible probabilité d'un bloom en profondeur non détecté par satellite (le 11/03/2025)
4	19/03/2025	[Chl-a] < 10 µg/L	Faible probabilité d'un bloom en profondeur non détecté par satellite (le 23/03/2025)
5	09/04/2025	[Chl-a] ≥ 10 µg/L (à partir de 10 de profondeur)	Présence potentielle d'un bloom en profondeur non détecté par satellite
6	28/04/2025	[Chl-a] ≥ 10 µg/L (à partir de 11 m de profondeur)	Présence potentielle d'un bloom en profondeur non détecté par satellite
7	14/05/2025	[Chl-a] < 10 µg/L	Faible probabilité d'un bloom en profondeur non détecté par satellite (le 14/05/2025)
8	27/05/2025	[Chl-a] < 10 µg/L	Situation indéterminée (pas de données satellite Secchi ±7 jours par rapport à la date)
9	10/06/2025	[Chl-a] < 10 µg/L	Situation indéterminée (pas de données satellite Secchi ±7 jours par rapport à la date)
10	24/06/2025	[Chl-a] < 10 µg/L	Présence potentielle d'un bloom en profondeur non détecté par satellite
11	17/07/2025	[Chl-a] ≥ 10 µg/L (à partir de 12 m de profondeur)	Présence potentielle d'un bloom en profondeur non détecté par satellite
12	30/07/2025	[Chl-a] ≥ 10 µg/L (à partir de 15 m de profondeur)	Présence potentielle d'un bloom en profondeur non détecté par satellite
13	12/08/2025	[Chl-a] < 10 µg/L	Faible probabilité d'un bloom en profondeur non détecté par satellite (le 09/08/2025)
14	25/08/2025	[Chl-a] < 10 µg/L	Faible probabilité d'un bloom en profondeur non détecté par satellite (le 25/08/2025)
15	08/09/2025	[Chl-a] < 10 µg/L	Faible probabilité d'un bloom en profondeur non détecté par satellite (le 03/09/2025)
16	08/10/2025	[Chl-a] < 10 µg/L	Faible probabilité d'un bloom en profondeur non détecté par satellite (le 07/10/2025)
17	29/10/2025	[Chl-a] < 10 µg/L	Faible probabilité d'un bloom en profondeur non détecté par satellite (le 28/10/2025)
18	12/11/2025	[Chl-a] < 10 µg/L	Faible probabilité d'un bloom en profondeur non détecté par satellite (le 11/11/2025)
19	03/12/2025	[Chl-a] < 10 µg/L	Faible probabilité d'un bloom en profondeur non détecté par satellite (le 27/11/2025)
20	17/12/2025	[Chl-a] < 10 µg/L	Situation indéterminée (pas de données satellite Secchi ±7 jours par rapport à la date)

Sommaire de la présentation

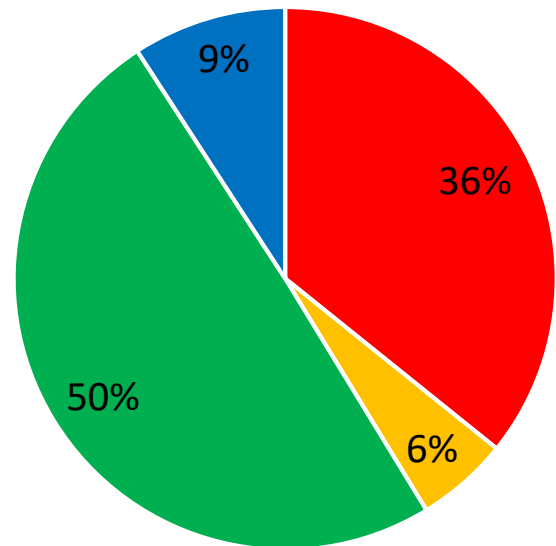
- Contexte et objectifs
- Présentation générale de l'outil (développé à partir des données de 2016 à 2024)
- Utilisation et résultats en 2025
- Enseignements tirés de la mise en application en 2026
- Limites, critiques et perspectives

Enseignements tirés de la mise en œuvre en 2026

- Exécution quotidienne du script et diffusion du rapport généré à une liste de diffusion comprenant 325 adresses e-mail fournies par le WP4 du projet ALGA, axée sur la gestion et la gouvernance du lac Léman

Enseignements tirés de la mise en œuvre en 2026

- Exécution quotidienne du script et diffusion du rapport généré à une liste de diffusion comprenant 325 adresses e-mail fournies par le WP4 du projet ALGA, axée sur la gestion et la gouvernance du lac Léman
- Résumé des retours :



A demandé à être retiré de la liste

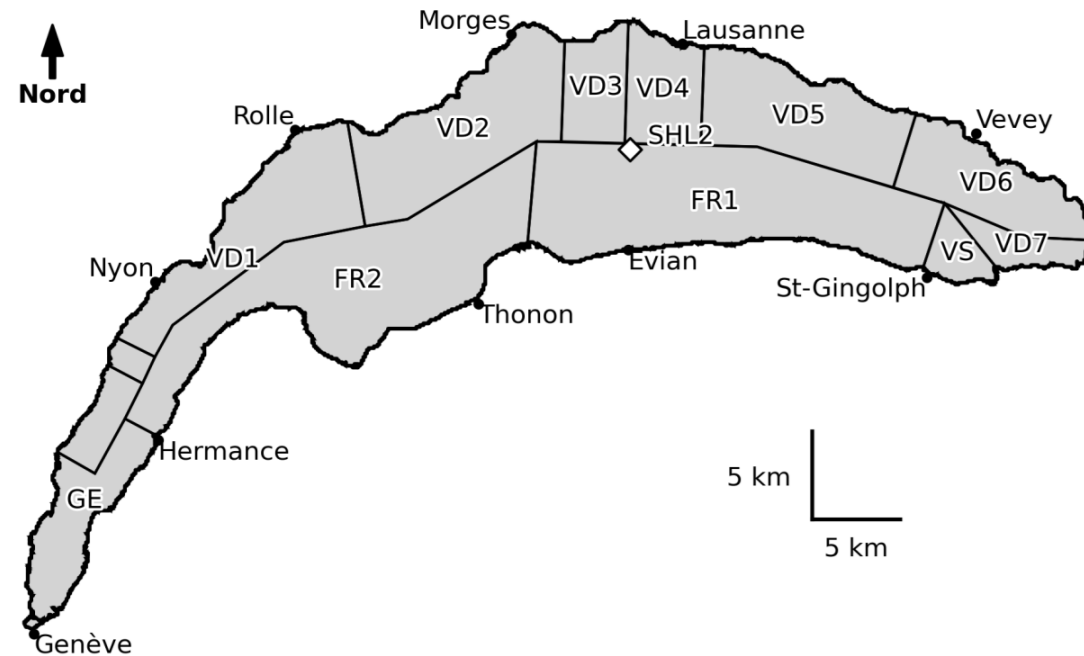
A demandé à être retiré de la liste, mais a fourni une ou plusieurs autres adresses

N'a pas répondu

A manifesté un intérêt

Qui a manifesté un intérêt ?

- Communes : Anthy-sur-Léman, Bourg-en-Lavaux, Crans VD, Evian-les-Bains, Lausanne, Morges, Montreux, Noville, Nyon, Paudex, Pully, Rolle, Saint-Saphorin, Saint-Sulpice, Vevey
- Canton du Valais (VS)
- Canton de Vaud (VD)
- Etat de Genève (GE)
- Thonon agglomération (FR2)
- ARS
- OFEV
- Grand Annecy



Sommaire de la présentation

- Contexte et objectifs
- Présentation générale de l'outil (développé à partir des données de 2016 à 2024)
- Utilisation et résultats en 2025
- Enseignements tirés de la mise en application en 2026
- Limites, critiques et perspectives

Limites, critiques et perspectives

- Limites de la modélisation *sensu stricto* :
 - Modèle de suivi de particules : pas de prise en compte du transport vertical
 - Couplage avec les processus de croissance et de mortalité du phytoplancton non considéré
 - Jeu de données encore peu abondant pour tester la robustesse du modèle Random Forest

Limites, critiques et perspectives

- Limites de la modélisation *sensu stricto* :
 - Modèle de suivi de particules : pas de prise en compte du transport vertical
 - Couplage avec les processus de croissance et de mortalité du phytoplancton non considérés
 - Jeu de données encore peu abondant pour tester la robustesse du modèle Random Forest
- Critique entendable :
 - Choix du seuil des 10 $\mu\text{g Chl-a/L}$: justification multiple (revue systématique, algorithme, OMS)

Limites, critiques et perspectives

- Limites de la modélisation *sensu stricto* :
 - Modèle de suivi de particules : pas de prise en compte du transport vertical
 - Couplage avec les processus de croissance et de mortalité du phytoplancton non considérés
 - Jeu de données encore peu abondant pour tester la robustesse du modèle Random Forest
- Critique entendable :
 - Choix du seuil des 10 $\mu\text{g Chl-a/L}$: justification multiple (revue systématique, algorithme, OMS)
- Perspectives :
 - Affiner la résolution spatiale pour zoomer sur des zones d'intérêt (plages, secteur de pêche)
 - Meilleure communication sur l'utilisation de l'outil (résultats à venir du WP4)
 - Evaluer la transférabilité du modèle à d'autres lacs (exemple : lac de Garde en Italie, projet DiMark)



Merci pour votre attention

Frédéric SOULIGNAC¹, Orlane ANNEVILLE¹, Jonathan DEROT², Thibault MALOU¹, Alexandre MAYER¹, Sayoob VADAKKE-CHANAT¹, Stéphan JACQUET¹

¹UMR CARRETEL, INRAE, Université Savoie-Mont Blanc, Thonon-les-Bains, France

²Advanced Institute for Marine Ecosystem Change (WPI-AIMEC), Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), Yokohama, Japan

