

Résumé des modèles hydrodynamiques et de qualité de l'eau utilisés pour la gestion des bassins versants et des lacs.

Classes et domaine d'application	Nom du modèle et référence	Description des caractéristiques	Exemple d'utilisation	Commentaire globaux
Classe: 1 Domaine: lac, bassin versant	Modèle une boîte de Vollenweider [1], [2]	Modèle de bilan de masse pour estimer les concentrations annuelles moyennes de phosphore, permettant d'analyser les tendances d'eutrophisation d'un système aquatique.	Utilisé par l'Eawag pour estimer l'évolution des concentrations en phosphore des lacs du plateau suisses [3], [4], [5]	Modèle simple à utiliser pour reproduire les variations annuelles de phosphore, nécessitant seulement des données de phosphore dans les affluents et une estimation de la sédimentation nette.
Classe: 1 Domaine: lac, bassin versant	Modèle multi-boîtes [6], [7], [8], [9]	Modèle de bilan de masse à plusieurs compartiments reproduisant la stratification et/ou les sédiments.	Utilisé pour reproduire les variations saisonnières de phosphore dans les lacs. Voir l'exemple d'application sur le lac de Baldegg.	Modèle simple permettant de reproduire les variations saisonnières de phosphore, nécessitant, en plus, une estimation des apports internes (recyclage) par rapport au modèle une boîte.
"Classe: 1 Domain: bassin versant"	SPARROW ¹	Modèle de régression statistique, prédit la variation du phosphore en fonction des variables environnementales et humaines.	Utilisé pour prévoir les charges de phosphore dans les bassins versants aux États-Unis.	Basé sur des données historiques de précipitations, type et utilisation des sols et vitesse de l'eau des cours d'eau. Open source, mais jamais utilisé pour les bassins versants suisses.
Classe: 1 Domaine: bassin versant	MODIFFUS [10]	Modèle statistique pour estimer les apports totaux et diffus de nutriments (phosphore et azote) dans les cours d'eau suisses.	Combinaison de données détaillées sur l'utilisation des sols, des conditions naturelles, des recherches sur le terrain, des études bibliographiques et des avis d'experts pour quantifier les apports totaux et diffus de nutriments à une résolution annuelle d'un hectare pour toute la Suisse.	Développé en Suisse par l'Agroscope, les résultats du modèle sont disponibles sur le site de la Confédération et offrent une vue détaillée des zones à risque.

¹ <https://www.ijc.org/fr/iwi-iibh/modele-detude-des-bassins-versants-sparrow>

Classe: 1 Domain: bassin versant	RS [11]	Modèle hydrologique de transformation pluie-débit.	Utilisé pour la prévision du débit dans les cours d'eau et pour simuler le transport de polluants dans les cours d'eau [12].	Nécessite des données de précipitations, de température et des concentrations initiales de polluants.
Classe: 2 Domaine: lac, bassin versant	MIKE (DHI) [13]	Logiciel intégrant plusieurs modules pour les simulations hydrodynamiques du transport des sédiments (cohésifs et non cohésifs) et des nutriments.	Utilisé dans le projet LATLAS pour la modélisation des courants (seulement pour le lac de Zurich) et des vagues pour les principaux lacs suisses [14].	La quantité de données demandées augmente avec la complexité du problème et le nombre de modules sélectionnés. Logiciel payant et utilisé en Suisse pour plusieurs projets.
Classe: 2 Domaine: lac, bassin versant	TELEMAC [15]	Système de modélisation hydrodynamique 1D/2D/3D, utilisé pour simuler les courants, les vagues, le transport des sédiments et les processus d'inondation.	Fréquemment utilisé pour le transport sédimentaire et les problèmes d'évolution morphologique [16], [17].	Logiciel open source développé par le Laboratoire National d'Hydraulique (LNHE) de l'Électricité de France. Pas d'exemple pour les lacs suisses.
Classe: 2 Domain: lac, bassin versant	FVCOM	Modèle hydrodynamique 3D qui utilise des équations primitives pour simuler les courants, la température, la salinité et la densité dans les zones côtières.	Utilisé principalement pour des études océanographiques et côtières caractérisées par des géométries complexes, comme par exemple pour simuler les processus d'inondation et de drainage de marée dans l'estuaire de la rivière Satilla	Logiciel open source développé conjointement par UMASDD et WHOI. Utilisé en Suisse dans le cadre du projet EU-FP7 HYPOX pour étudier l'appauvrissement en oxygène dans les systèmes aquatiques
Classe: 2 Domain: bassin versant	Basement	Modèle hydrodynamique 2D pour la simulation des écoulements en surface et des processus de transport	Utilisé pour plusieurs projets hydraulique. Un exemple est la prévision des changements morphologiques des rivières et des deltas en réponse aux changements naturels et anthropogéniques	Développé par l'ETHZ, nécessite des données topographiques et hydrologiques. Open source, développé par l'ETHZ et utilisé en Suisse
Classe: 2 Domain: bassin versant	HEC-RAS	Modèle de simulation 1D et 2D des écoulements fluviaux, y compris le transport des sédiments et des nutriments.	Utilisé pour modéliser les processus d'inondation, les dépôts de sédiments et les opérations de vidange, comme dans le cas du barrage de Gebidem	Nécessite des données détaillées sur les débits et la géométrie des rivières. Logiciel libre avec une version payante pour plus de fonctionnalité; utilisé en Suisse.
Classe: 2 Domain: bassin versant	SWAT	Modèle physique qui prévoit l'impact des pratiques de gestion des terres sur les rendements en eau, en sédiments et en produits chimiques agricoles dans les bassins versants avec des sols, des utilisations des terres et des conditions de gestion variables.	Utilisé par l'Eawag pour simuler tous les processus affectant l'eau, les sédiments et les nutriments dans le bassin versant de la Thur	Nécessite des données météorologiques, du sol et de l'utilisation du sol. Open source et utilisé en Suisse par l'Eawag.

Classe: 2 Domain: lac	SIMSTRAT-AED	Modèle physique unidimensionnel open-source couplé à la librairie AED couvrant les processus biogéochimiques aquatiques.	Modèle physique largement utilisé en Suisse pour reproduire l'évolution à long-terme de la structure thermique des lacs. Couplage avec la librairie AED testé pour les gaz dissous	Open source, modèle physique développé par l'Eawag et utilisé en Suisse, librairie AED comportant des modules indépendants ou combinables.
Classe: 3 Domain: lac, bassin versant	CE-QUAL-W2	Modèle bidimensionnel qui intègre les équation de transformation du phosphore avec l'équation du transport de sédiments.	Étude conjointe Eawag-EPFL sur l'impact des centrales hydroélectriques de pompage-turbinage	Nécessite des données détaillées sur l'hydrodynamique et la qualité de l'eau. Logiciel libre mais pas open source. Utilisé en Suisse par l'Eawag.
Classe: 3 Domaine: lac, bassin versant	COHERENS [18]	Modèle hydrodynamique 2D et 3D avec des modules biologique et de transport sédimentaire.	Utilisé dans le cadre du projet FORCOAST, financé par l'UE, vise à soutenir la pêche, la mariculture des bivalves et la restauration des bancs d'huîtres le long des côtes européennes [19].	Logiciel open source développé par des chercheurs de RBINS et utilisé principalement dans le domaine académique. Pas de bibliographie pour les lacs suisses.
Classe: 3 Domaine: lac, bassin versant	MIKE ECO Lab [13]	Module de MIKE DHI pour intégrer, si couplé avec un logiciel hydrodynamique 3D, le cycle complet du phosphore dans les simulations hydrodynamiques.	Utilisé pour simuler l'oxygène dissous et la demande biochimique en oxygène dans un système lacustre afin d'évaluer la qualité environnementale du lac [20]	Module du logiciel payant MIKE21, qui nécessite des données détaillées et complexes. Pas de bibliographie qui mentionne des applications pour les lacs suisses.

Bibliographie non exhaustive:

- [1] R. A. Vollenweider, « Scientific Fundamentals of the Eutrophication of Lakes and Flowing Waters, with Particular Reference to Nitrogen and Phosphorous as Factors in Eutrophication. » Organization for Economic Co-Operation and Development. Directorate for Scientific Affairs, Paris., 1968.
- [2] R. A. Vollenweider, « Möglichkeiten und Grenzen elementarer Modelle der Stoffbilanz von Seen », p. 1-36, 1969.
- [3] B. Müller et Schmidt M, « Bilans du phosphore et de l'oxygène dans le lac de Morat. » Rapport Eawag pour les cantons de Fribourg (SEN) et de Vaud (SESA)., 2009.
- [4] B. Müller, R. Gächter, et A. Wüest, « Accelerated Water Quality Improvement during Oligotrophication in Peri-Alpine Lakes », *Environ. Sci. Technol.*, vol. 48, n° 12, p. 6671-6677, juin 2014, doi: 10.1021/es4040304.
- [5] R. Gächter et D. M. Imboden, « Lake restoration », in *Chemical processes in lakes*, Wiley., vol. 12, in Lake restoration, vol. 12. , 1985, p. 365-388.
- [6] D. M. Imboden, « Phosphorus model of lake eutrophication », *Limnology & Oceanography*, vol. 19, n° 2, p. 297-304, mars 1974, doi: 10.4319/lo.1974.19.2.0297.
- [7] J. P. Jensen, A. R. Pedersen, E. Jeppesen, et M. Søndergaard, « An empirical model describing the seasonal dynamics of phosphorus in 16 shallow eutrophic lakes after external

- loading reduction », *Limnology & Oceanography*, vol. 51, n° 1part2, p. 791-800, janv. 2006, doi: 10.4319/lo.2006.51.1_part_2.0791.
- [8] L. Håkanson et A. C. Bryhn, « A Dynamic Mass-balance Model for Phosphorus in Lakes with a Focus on Criteria for Applicability and Boundary Conditions », *Water Air Soil Pollut*, vol. 187, n° 1-4, p. 119-147, nov. 2007, doi: 10.1007/s11270-007-9502-1.
- [9] P. C. Hanson *et al.*, « Predicting lake surface water phosphorus dynamics using process-guided machine learning », *Ecological Modelling*, vol. 430, p. 109136, août 2020, doi: 10.1016/j.ecolmodel.2020.109136.
- [10] C. Hutchings, E. Spiess, et V. Prasuhn, « Abschätzung diffuser Stickstoff-und Phosphoreinträge in die Gewässer der Schweiz mit MODIFFUS 3.1, Stand 2020." 155 (2023): 161. », *Agroscope Science*, n° 155, p. 161.
- [11] e-dric.ch, « User's guide, comprehensive description of the RS3.0 hydrological simulation model, internal report ». 2012.
- [12] F. Jordan et A. Leroquais, « Analyse des immissions de diclofénac dans la Glâne par simulation pluie-débit". (2024) ». Rapport Hydrique pour le Canton de Fribourg, 2024.
- [13] « MIKE 21 Documentation ». DHI. Consulté le: 1 septembre 2024. [En ligne]. Disponible sur: https://manuals.mikepoweredbydhi.help/2017/MIKE_21.htm
- [14] « Internet platform Swisslakes pour le projet LATLAS ». Consulté le: 1 septembre 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://swisslakes.net/>
- [15] J.-M. Hervouet, « TELEMAC, a hydroinformatic system. », *La houille blanche*, p. 21-28, 1999.
- [16] P. Tassi *et al.*, « GAIA - a unified framework for sediment transport and bed evolution in rivers, coastal seas and transitional waters in the TELEMAC-MASCARET modelling system », *Environmental Modelling & Software*, vol. 159, p. 105544, janv. 2023, doi: 10.1016/j.envsoft.2022.105544.
- [17] J. M. Brown et A. G. Davies, « Methods for medium-term prediction of the net sediment transport by waves and currents in complex coastal regions », *Continental Shelf Research*, vol. 29, n° 11-12, p. 1502-1514, juin 2009, doi: 10.1016/j.csr.2009.03.018.
- [18] Institute of Natural Sciences (OD Nature), « COHERENS full Manual ». Consulté le: 1 septembre 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://odnature.naturalsciences.be/coherens/manual#manual>
- [19] RBINS et 27 partners, « ForCoast: Earth Observation Services for Fishery, Bivalves Mariculture and Oysterground Restoration along European Coasts ». EU-H2020, 2022 2019. Consulté le: 1 septembre 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://forcoast.eu/>
- [20] E. Khwairakpam, R. Khosa, A. Gosain, et A. Nema, « Water quality assessment of Loktak Lake, Northeast India using 2-D hydrodynamic modelling », *SN Appl. Sci.*, vol. 3, n° 4, p. 422, avr. 2021, doi: 10.1007/s42452-021-04440-8.