



**HAL**  
open science

# Rapport d'avancement sur les outils de modélisation thermique

Pierre-Alain Danis

► **To cite this version:**

Pierre-Alain Danis. Rapport d'avancement sur les outils de modélisation thermique. [Rapport Technique] 1-8, OFB; INRAE; Université Savoie Mont Blanc. 2020. hal-03253847

**HAL Id: hal-03253847**

**<https://hal.inrae.fr/hal-03253847>**

Submitted on 8 Jun 2021

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



INRAE



# Impacts des changements climatiques sur la température des milieux lenticques

Rapport d'avancement sur les outils de modélisation thermique

Pierre-Alain Danis

Décembre 2020

Pôle R&D ECLA

Site INRAE d'Aix-en-Provence  
3275 route Cézanne – 13100 Le Tholonet

# SOMMAIRE

<b>I Contexte.....</b>	<b>3</b>
<b>II Paquet <i>okplm</i>.....</b>	<b>3</b>
II.1 Qu'est-ce que le paquet <i>okplm</i> .....	3
II.2 Références bibliographiques.....	4
<b>III Paquet <i>glmtools</i>.....</b>	<b>4</b>
III.1 Qu'est-ce que le paquet <i>glmtools</i> .....	4
III.2 Références bibliographiques.....	4
<b>IV Paquet <i>tributary</i>.....</b>	<b>5</b>
IV.1 Qu'est-ce que le paquet <i>tributary</i> .....	5
IV.2 Références bibliographiques.....	5
<b>V Paquet <i>cuspy</i>.....</b>	<b>5</b>
V.1 Qu'est-ce que le paquet <i>cuspy</i> .....	5
V.2 Références bibliographiques.....	6
<b>VI Paquet <i>tmod</i>.....</b>	<b>6</b>
VI.1 Qu'est-ce que le paquet <i>t-mod</i> .....	6
<b>VII Paquet <i>alaprod</i>.....</b>	<b>7</b>
VII.1 Qu'est-ce que le paquet <i>alaprod</i> .....	7
<b>VIII Résultats disponibles.....</b>	<b>7</b>
VIII.1 Les types de forçage météorologiques.....	7
VIII.2 Résultats avec OKP.....	8

# I Contexte

Afin d'apporter des connaissances opérationnelles sur les trajectoires thermiques de plusieurs centaines de plans d'eau français impliqués dans la mise en application de la Directive Cadre européenne sur l'Eau, i.e. de surface supérieure à 50 ha, la plateforme de modélisation Alamode développée au Pôle Ecla et en collaboration avec le bureau d'étude SEGULA dans le cadre d'un marché recherche OFB comporte plusieurs briques élémentaires de modélisation, de calibration-validation, d'estimation des incertitudes et de gestion des modélisations dans une base de données appelée T-MOD. Ces différentes fonctionnalités sont implémentées dans différents paquets codés en Python pouvant être utilisés individuellement ou par le biais d'un paquet global Alamode-Production dit **alaproduct**.

Les paquets Python sont disponibles sur le gitlab de Irstea (<https://gitlab.irstea.fr/alamode>) et sont les suivants :

- **okplm (cf §II)** : modèle semi-empirique 0D Ottosson-Kettle-Prats (OKP) (Prats et Danis 2019) résultat d'un couplage des modèles de Ottosson & Abrahamsson (1998) et Kettle et al. (2004), calé sur une base de données de température de surface des plans d'eau dérivée de l'imagerie Landsat également produite par le Pôle Écla (Prats et al. 2018, Simon et al. 2014)
- **glmtools (cf §III)** : paquet permettant d'exécuter le modèle thermodynamique monodimensionnel vertical GLM (General Lake Model, Hipsey et al. 2019)
- **triburaty (cf §IV)** : paquet en Python 3 utilisé pour estimer les caractéristiques des tributaires des lacs, en particulier le débit et la température de l'eau. Pour la simulation du débit, le paquet implémente un modèle hydrologique journalier développé par le groupe de recherche HYDRO d'Irstea (Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture) : le modèle GR4J (Perrin et al., 2003), en option couplé au modèle de neige CemaNeige (Valéry, 2010)
- **cuspy (cf §V)** : paquet en Python 3 permettant la mise en œuvre des méthodes d'analyses d'incertitudes linéaires et non linéaires, des méthodes d'étalonnage et des méthodes d'analyses de sensibilité globale.
- **tmod (cf §VI)** : le paquet **tmod** (Temperature MODelling) est un paquet en Python 3 utilisé pour gérer la base de données T-MOD, dans le cadre du projet Alamode.
- **alaproduct (cf §VII)** : **alaproduct** est un paquet en Python 3 utilisé pour faire des simulations pour le projet ALAMODE (A LAke MODElling project). Il est conçu pour fonctionner en coordination avec la base de données et le paquet **tmod**.

La suite de ce rapport présente brièvement ces différents paquets et renvoie aux documents en anglais et en français détaillés d'utilisation de ces paquets.

## II Paquet okplm

### II.1 Qu'est-ce que le paquet okplm

**okplm** (modèle de lacs d'Ottosson-Kettle-Prats) est un paquet en Python 3 utilisé pour simuler la température de l'épilimnion et de l'hypolimnion des plans d'eau douce avec le modèle de lacs d'Ottosson-Kettle-Prats (OKP) (Prats & Danis, 2019).

Le modèle OKP simule la température de l'eau à fréquence journalière utilisant la température de l'air [en °C] et le rayonnement solaire [en W m<sup>2</sup>] comme données d'entrée. Le modèle OKP est le résultat de la combinaison des modèles développés par Ottosson & Abrahamsson (1998) et Kettle et al. (2004). Le développement du modèle a été financé par l'AFB (Agence Française pour la Biodiversité, anciennement ONEMA, Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques) et une version préliminaire a été présentée dans le rapport par Prats & Danis (2015). La version définitive a été publiée par Prats & Danis (2019).

Pour calculer la température de l'eau avec okplm il faut définir les valeurs d'une série de paramètres. Il est possible d'utiliser les valeurs par défaut des paramètres obtenues pour les plans d'eau français. Ces valeurs sont le résultat de la paramétrisation en fonction des caractéristiques des lacs (latitude, altitude, profondeur maximale, surface, volume) proposée par Prats & Danis (2019). Cette paramétrisation a été obtenue après analyse de données issues des réseaux nationaux de surveillance mis en place pour la mise en application de la Directive Cadre européenne sur l'Eau pour 414 plans d'eau français de surface supérieure à 0,06 km<sup>2</sup>. La table suivante présente les gammes des valeurs des caractéristiques de ces plans d'eau et donc le domaine d'applicabilité de la paramétrisation par défaut.

Tableau 1: Gammes des valeurs des caractéristiques des plans d'eau utilisées pour caler les valeurs des paramètres du modèle OKP. Ces gammes correspondent donc au domaine d'applicabilité de la paramétrisation par défaut.

Variable	Min.	Max.
Altitude (m)	0	2841
Latitude (°N)	41,47	50,87
Profondeur maximale (m)	0,8	310
Surface max. (km <sup>2</sup> )	0,06	580
Volume max. (hm <sup>3</sup> )	0,12	89000

Les valeurs des paramètres peuvent aussi être définies par l'utilisateur. Il est possible de trouver les valeurs de certains paramètres pour d'autres régions comme pour des lacs suédois dans les travaux d'Ottosson & Abrahamsson (1998) ou pour la température de l'épilimnion de lacs du sud-ouest de Groenland dans les travaux de Kettle et al. (2004).

Enfin, si des données de terrain sont disponibles, les valeurs des paramètres peuvent être calées par l'utilisateur avec le paquet.

Voir plus de détails sur la documentation du gitlab dédié : <https://gitlab.irstea.fr/alamode/okplm>

## II.2 Références bibliographiques

Kettle, H.; Thompson, R.; Anderson, N. J.; Livingstone, D. M. (2004) Empirical modeling of summer lake surface temperatures in southwest Greenland. *Limnology and Oceanography*, 49 (1), 271-282.

Ottosson, F. ; Abrahamsson, O. (1998) Presentation and analysis of a model simulating epilimnetic and hypolimnetic temperatures in lakes. *Ecological Modelling*, 110, 233-253.

Prats, J.; Danis, P.-A. (2015) Optimisation du réseau national de suivi pérenne in situ de la température des plans d'eau : apport de la modélisation et des données satellitaires. Final report. Irstea-Onema, Aix-en-Provence. 93 p.

Prats, J.; Danis, P.-A. (2019) An epilimnion and hypolimnion temperature model based on air temperature and lake characteristics. *Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems*, 420, 8.

## III Paquet *glmtools*

### III.1 Qu'est-ce que le paquet *glmtools*

Le paquet *glmtools* est un paquet Python 3 permettant d'exécuter le modèle thermodynamique monodimensionnel vertical GLM (General Lake Model, Hipsey et al. 2019) et permettant de gérer la création des fichiers d'entrée et de configuration. Le développement du paquet est le résultat des efforts conjugués de l'Agence Française pour la Biodiversité et Segula Technologies. L'objectif est de faciliter l'utilisation de GLM aux chercheurs et gestionnaires.

GLM est un modèle 1D de simulation du comportement hydrodynamique des plans d'eau (lacs, réservoirs, zones humides). Il simule la température de l'eau et d'autres variables à fréquence journalière ou infra-journalière en utilisant des forçages météorologiques et hydrologiques.

GLM a été développé et est maintenu par le groupe de recherche Aquatic Ecodynamics de l'University of Western Australia. Bien que GLM a été développé dans les dernières années, il hérite beaucoup de ses caractéristiques de modèles antérieures comme DYRESM (DYnamic REservoir Simulation Model, Hamilton & Schladow 1997) et DLM (Dynamic Lake Model, Chung et al. 2008). De plus, beaucoup de fonctionnalités et options de configuration ont été ajoutées.

GLM a été testé intensivement dans dizaines de lacs autour du monde (Bruce et al. 2018) et centaines de plans d'eau en France (Prats-Rodríguez & Danis, 2017, 2018).

Voir plus de détails (installation, guide de style de codage, modules, valeurs des paramètres, options de simulation, données d'entrées, données de sorties, exemples) sur la documentation du gitlab dédié : <https://gitlab.irstea.fr/alamode/glmtools>

### III.2 Références bibliographiques

Bruce, L. C., Frassl, M. A., Arhonditsis, G. B., Gal, G., Hamilton, D. P., Hanson, P. C., Hetherington, A. L., Melack J. M., Read, J. S., Rinke, K., Rigosi, A., Trolle, D., Winslow, L., Adrian, R., Ayala, A. I., Bocaniov, S. A., Boehrer, B., Boon, C., Brookes, J. D., Bueche, T., Busch, B. D., Copetti, D., Cortés, A., de Eyto, E., Elliott, J. A., Gallina, N., Gilboa, Y., Guyennon, N., Huang, L., Kerimoglu, O., Lenters, J. D., MacIntyre, S., Makler-Pick, V., McBride, C. G., Moreira, S., Özkundakci, D., Pilotti, M., Rueda, F. J., Rusak, J. A., Samal, N. R., Schmid, M., Shatwell, T., Snorthheim, C., Soullignac, F., Valerio, G., van der Linden, L., Vetter, M., Vinçon-Leite, B., Wang, J., Weber, M., Wickramaratne, C., Woolway, R. I., Yao, H., Hipsey, M. R. (2018) A multi-lake comparative analysis of the General Lake Model (GLM) : Stress testing across a global observatory network. *Environmental Modelling & Software*, 102, 274-291.

Chung, E. G., Schladow, S. G., Perez-Losada, J., Robertson, D. M. (2008) A linked hydrodynamic and water quality model for the Salton Sea. *Hydrobiologia*, 604, 57-75.

Hamilton, D. P., Schladow, S. G. (1997) Water quality in lakes and reservoirs. Part I : Model description. *Ecological Modelling*, 96, 91-110.

Hipsey, M. R.; Bruce, L. C.; Boon, C.; Busch, B.; Carey, C. C.; Hamilton, D. P.; Hanson, P.C.; Read, J. S.; de Sousa, E.; Weber, M.; Winslow, L. A. (2019) A General Lake Model (GLM 3.0) for linking with high- frequency sensor data from the Global Lake Ecological Observatory Network (GLEON). *Geoscientific Model Development*, 12, 473-523.

Prats-Rodríguez, J., Danis, P.-A. (2017) Évolution des températures de l'épilimnion et de l'hypolimnion des plans d'eau DCE nationaux. Rapport convention AFB-Irstea. Irstea, Aix-en-Provence. 34 p.

Prats-Rodríguez, J., Danis, P.-A. (2018) Estimation des conditions de référence et seuils de qualité pour le paramètre « température de l'eau » en plans d'eau. Rapport convention AFB-Irstea. Irstea, Aix-en-Provence. 43 p.

## IV Paquet *tributary*

### IV.1 Qu'est-ce que le paquet *tributary*

***tributary*** est un paquet en Python 3 utilisé pour estimer les caractéristiques des tributaires des lacs, en particulier débit et température.

Pour la simulation du débit, le paquet implémente un modèle hydrologique journalier développé par le groupe de recherche HYDRO d'Irstea (Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agri- culture) : le modèle GR4J (Perrin et al., 2003), en option couplé au modèle de neige CemaNeige (Valéry, 2010).

Pour la simulation de la température des cours d'eau, le paquet fournit trois modèles différents. Deux d'entre eux utilisent la température de l'air comme données de forçage : le modèle sigmoïde proposé par Mohseni et al. (1998), et une modification de ce modèle proposée par Koch & Grunewald (2010) où on utilise une moyenne mobile de la température de l'air au lieu de valeurs journalières. Le troisième modèle est la classification de régimes thermiques de Maheu et al. (2016).

Voir plus de détails (installation, guide de style de codage, modules, utilisation, test, exemples d'utilisation) sur la documentation du gitlab dédié : <https://gitlab.irstea.fr/alamode/tributary>

### IV.2 Références bibliographiques

Koch, H. ; Grunewald, U. (2010) Regression models for daily stream temperature simulation : case studies for the river Elbe, Germany. *Hydrological Processes*, 24(26), 3826-3836.

Maheu, A.; Poff, N.L.; St-Hilaire, A. 2016 A classification of stream water temperature regimes in the conterminous USA. *River Research and Applications* 32 (5), 896-906.

Mohseni, O., Stefan, H.G., Erickson, T.R. (1998) A nonlinear regression model for weekly stream temperatures. *Water Resources Research* 34(10), 2685-2692.

Perrin, C. ; Michel, C. ; Andréassian, V. (2003) Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of Hydrology*, 279, 275-289.

Valéry, A. (2010) Modélisation précipitations - débit sous influence nivale. Élaboration d'un module neige et évaluation sur 380 bassins versants. PhD thesis. AgroParisTech, Antony (France)

## V Paquet *cuspy*

### V.1 Qu'est-ce que le paquet *cuspy*

Le paquet **cuspy** est basé sur l'utilisation du progiciel Python **pyemu** (White et al. 2016) et de la suite d'outils logiciels PEST++ (White et al. 2019). PEST et PEST++ (Doherty et al. 2018) sont des suites logicielles conçues pour et utilisées principalement par la communauté hydrologique. Elles mettent en œuvre plusieurs analyses d'incertitudes linéaires et non linéaires, des méthodes d'étalonnage et des analyses de sensibilité globale. Le paquet **pyemu** offre une interface Python pour utiliser et configurer les outils PEST++ et pour accéder et traiter leurs résultats.

Toutefois, le paquet **cuspy** n'offre pas toutes les fonctionnalités de PEST++ et de **pyemu** (par exemple, les paramètres liés ne sont pas pris en charge). En fait, le paquet **cuspy** a été conçu dans le but de faciliter l'application des fonctionnalités de **pyemu** et de PEST++ aux modèles de température de l'eau et aux modèles hydrologiques mis en œuvre avec les paquets **okplm**, **glmtools** et **tributary**. Néanmoins, la conception du progiciel est suffisamment générale pour être assez indépendante du modèle. Les principales exigences sont que le modèle puisse être exécuté en ligne de commande et qu'il communique avec l'utilisateur par le biais de fichiers texte.

Voir plus de détails (théorie sur la modélisation-calibration-validation-incertitudes, exemples d'application à la température de l'eau, guide d'installation, guide de style de codage, modules, utilisation, exemples de données pour tester le paquet) sur la documentation du gitlab dédié : <https://gitlab.irstea.fr/alamode/cuspy>

## V.2 Références bibliographiques

Doherty, J. ; White, J. ; Welter, D. (2018) PEST & PEST++. An Overview. Watermark Numerical Computing. 48 p.

White, J.T. ; Fienen, M.N. ; Doherty, J.E. (2016) A python framework for environmental model uncertainty analysis. Environmental Modelling & Software, 85, 217-228

White, J. ; Welter, D. ; Doherty, J. (2019) PEST++ Version 4.2.16. PEST++ Development Team.

## VI Paquet *tmod*

### VI.1 Qu'est-ce que le paquet *t-mod*

Le paquet **t-mod** (Temperature MODelling) est un paquet en Python utilisé pour gérer la base de données T-MOD, dans le cadre du projet Alamode.

La base de données T-MOD est hébergée à l'INRAE (Institut National de la Recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement). La base de données a été conçue pour faciliter la réalisation et la consultation des simulations de température de l'eau réalisées dans le cadre du projet Alamode. La base de données peut également être utilisée pour suivre des données utilisées dans les simulations.

Le paquet **t-mod** est une interface pour gérer la base de données en utilisant Python des commandes et des scripts. Il peut être utilisé pour extraire des données de différentes sources de pour transformer ces données en fichiers standardisés, pour télécharger des données sur la base de données T-MOD et pour y accéder.

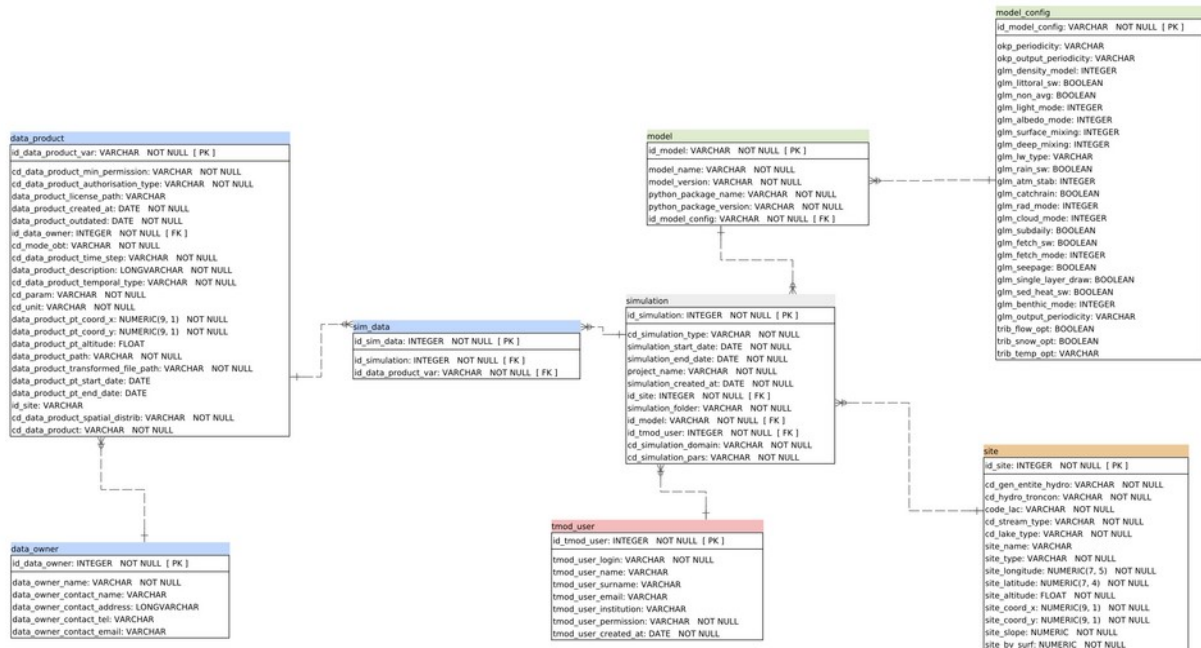


Figure 1: Modèle de la base de données t-mod

Voir plus de détails sur la documentation du gitlab dédié : <https://gitlab.irstea.fr/alamode/t-mod>

## VII Paquet *alapro*d

### VII.1 Qu'est-ce que le paquet *alapro*d

*alapro*d est un paquet en Python 3 utilisé pour faire des simulations pour le projet ALAMODE (A LAke MO-DElling project). Il est conçu pour fonctionner en coordination avec la base de données et le paquet *tmod*.

Le paquet permet de faire différents types de simulations :

- ◆ La température de l'épilimnion et de l'hypolimnion d'un lac en utilisant le paquet *okplm* (cf §II) ;
- ◆ La température de l'eau du lac à différentes profondeurs et et son hydrodynamisme en utilisant le paquet *glmtools* (cf §III) ;
- ◆ les débit des cours d'eau tributaires en utilisant le paquet *tributary* (cf §IV) ;
- ◆ La température de l'eau du cours d'eau en utilisant le paquet *tributary* (cf §IV).

## VIII Résultats disponibles

### VIII.1 Les types de forçage météorologiques

Les forçages météorologiques implémentés dans la plateforme de modélisation sont pour l'instant les données produites par le Système d'Analyse Fournissant des Renseignements Adaptés à la Nivologie ([SAFRAN](#)). Le module d'analyse objective SAFRAN (Durand et al, 1993), initialement développé au CNRM/CEN pour des besoins d'estimation opérationnelle des risques d'avalanche en zone montagneuse, est une application particulièrement bien adapté pour alimenter les modèles de surface à base physique nécessitant des données météorologiques complètes. Il est aussi utilisé opérationnellement pour le suivi hydrologique et l'estimation des débits sur toute la France métropolitaine. Ses principales caractéristiques sont l'utilisation d'une grille non régulière et une grande flexibilité dans les domaines d'analyse et les observations utilisées. La principale contrainte imposée à sa grille est une certaine homogénéité spatiale des quantités analysées. On notera que cette définition spatiale est bien adaptée aux zones de plaine, mais est plus discutable sur les zones de relief où les champs météorologiques peuvent être variables spatialement. En 2021, les données de la suite S2M (Vernay et al., 2019) seront intégrées dans la plateforme de modélisation Alamode afin d'affiner les trajectoires thermiques modélisées des plans d'eau des zones de relief.

En entrée, SAFRAN utilise comme ébauche des profils verticaux provenant d'un modèle météorologique (prévu ou analysé) et de nombreuses sources d'observations.

Les paramètres analysés sont par ce système sont :



- ◆ température, vent, humidité au voisinage de la surface et hors des effets de couche limite
- ◆ nébulosité (partielle sur 3 couches), précipitation (quantité et phase - liquide ou solide).
- ◆ les autres paramètres comme les rayonnements solaires directs et diffus ou le rayonnement infrarouge descendant sont évalués à partir des variables préalablement analysées.

## Références

Durand Yves, Brun Eric, Mérindol Laurent, Guyomarc'h Gilbert, Lesaffre Bernard and Eric Martin. 1993 : A meteorological estimation of relevant parameters for snow models, A. of Glaciol., 18, 65-71.

Vernay, M., Lafaysse, M., Hagenmuller, P., Nheili, R., Verfaillie, D., & Morin, S. (2019). The S2M meteorological and snow cover reanalysis in the French mountainous areas (1958 - present) [Data set]. AERIS. <https://doi.org/10.25326/37>

## VIII.2 Résultats avec OKP

En 2020, les travaux ont permis de fournir des résultats des trajectoires thermiques de 400 plans d'eau DCE. Les résultats implémentés dans la base de données t-mod sont :

- ◆ issues de modélisation sur la période 1958-2018 utilisant les données SAFRAN.
- ◆ issues d'une calibration soit :
  - « par défaut », i.e. pour **400 plans d'eau**, les valeurs des paramètres sont ceux décrits dans Prats et Danis (2019) et issue d'une calibration sur la base des données de température de surface satellitaires
  - ou « calibré » spécifiquement que les **146 plans d'eau** disposant de données de température issues du suivi de la mise en application de la Directive Cadre européenne sur l'Eau.

Dans tous les cas, les résultats fournissent pour chaque plan d'eau, une distribution des 100 trajectoires thermiques probables issues du paquet **cuspy**. La Figure suivante représente un exemple de résultats.

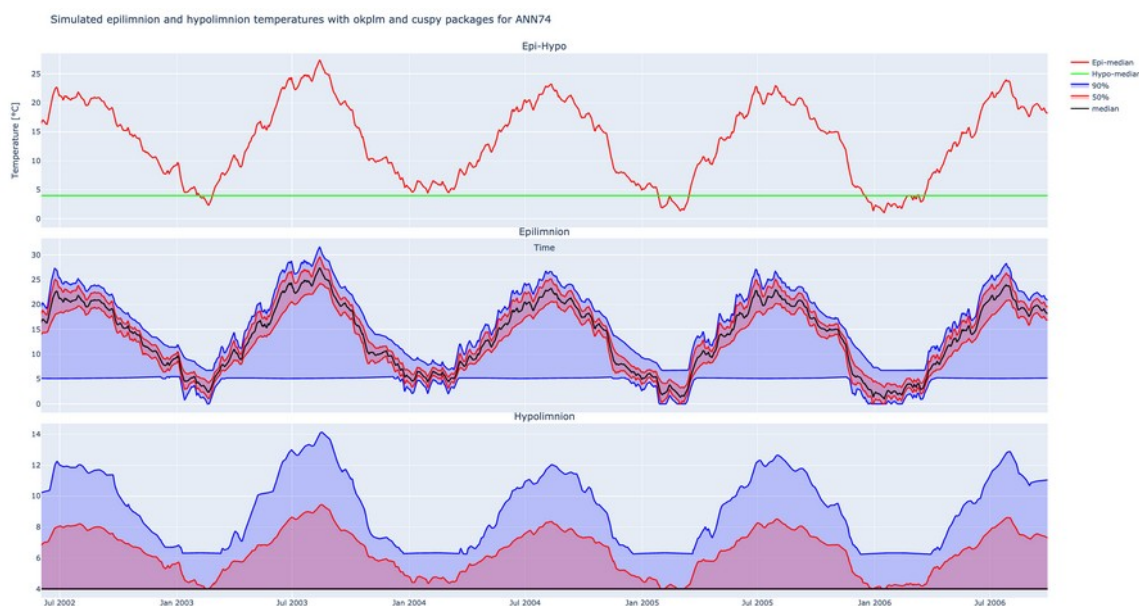


Figure 2: Exemple de probabilité de trajectoire thermique pour le plan d'eau d'Annecy sur la période 2002-2006.