

# **CACTUS : un outil de modélisation hydrologique interactif pour simuler des scénarios de changement climatique et de gestion du territoire dans un bassin versant personnalisable**

*CACTUS: an interactive hydrological modelling tool for simulating climate change and land management scenarios in a customisable catchment area*

**Louise MIMEAU<sup>1</sup>, Louis HERAUT<sup>1</sup>, Jean-Philippe VIDAL<sup>1</sup>, Flora BRANGER<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> INRAE Riverly, 5 rue de la Doua, 69100 Villeurbanne, [louise.mimeau@inrae.fr](mailto:louise.mimeau@inrae.fr)

## **RÉSUMÉ**

La modélisation hydrologique spatialisée est un outil utile pour la gestion de l'eau dans les territoires. Elle permet notamment de tester des solutions d'adaptation au changement climatique en simulant la réponse hydrologique du bassin versant à différents scénarios. Cependant, la mise en place d'un modèle hydrologique spatialisé sur bassin réel et son utilisation pour simuler des scénarios de changement climatique ou des scénarios d'adaptation peuvent demander plusieurs mois de travail.

CACTUS est un outil de modélisation hydrologique, développé pour les acteurs de la gestion de l'eau. Il a pour but de faciliter la concertation et la co-construction de solutions collectives. CACTUS contient une interface interactive qui permet de réaliser très facilement des simulations hydrologiques pour un bassin versant virtuel simplifié et personnalisable, puis de tester très rapidement des scénarios de changement climatique et d'aménagements sur un cas simplifié. Il peut ainsi être utilisé en début de projet pour explorer diverses stratégies territoriales d'adaptation au changement climatique, ou bien il peut être utilisé comme support pédagogique pour de la médiation scientifique lors d'échanges avec les élus locaux ou les utilisateurs de l'eau afin de répondre à leurs questions sur le fonctionnement des bassins versants ou sur les méthodes de modélisation hydrologiques. Les premières analyses des simulations hydrologiques obtenues avec CACTUS montrent que le comportement hydrologique général du bassin versant simulé par CACTUS est comparable à celui obtenu avec d'autres modèles hydrologiques de bassin versant plus réalistes.

## **ABSTRACT**

Spatial hydrological modelling is a useful tool for water management in local areas. In particular, it can be used to test solutions for adapting to climate change by simulating the hydrological response of the catchment to different scenarios. However, setting up a spatialised hydrological model on a real catchment and using it to simulate climate change scenarios or adaptation scenarios can take several months of work.

CACTUS is a hydrological modelling tool developed for water management stakeholders. Its aim is to facilitate consultation and the co-construction of collective solutions. CACTUS contains an interactive interface that makes it very easy to carry out hydrological simulations for a simplified, customisable virtual catchment, and then to quickly test climate change and development scenarios on a simplified case study. It can therefore be used at the start of a project to explore various local strategies for adapting to climate change, or it can be used as a teaching aid for scientific mediation during discussions with local elected representatives or water users to answer their questions about hydrological processes and hydrological modelling. Primary analyses of the hydrological simulations obtained with CACTUS show that the general hydrological behaviour of the catchment simulated by CACTUS is comparable to that obtained with other, more realistic catchment hydrological models.

## **MOTS CLÉS**

gestion de l'eau, médiation scientifique, modélisation hydrologique, scénarios aménagement du territoire, scénarios changement climatique

climate change scenarios, hydrological modelling, land use planning scenarios, scientific mediation, water management

## 1 CONTEXTE ET OBJECTIF DE CACTUS

L'outil CACTUS (CustomizAble CaTchment model for water Use Scenarios) est développé dans le cadre des activités de recherche en modélisation hydrologique menées par l'équipe Hydrologie des bassins versants de l'unité de recherche INRAE RiverLy.

CACTUS est une interface interactive qui permet de réaliser très facilement des simulations hydrologiques pour un bassin versant simplifié et de visualiser les résultats. La mise en place d'un modèle hydrologique spatialisé sur un bassin réel et son utilisation pour simuler des scénarios de changement climatique ou des scénarios d'adaptation peuvent demander plusieurs mois de travail. En permettant de personnaliser les caractéristiques d'un bassin versant simplifié, CACTUS permet de réaliser des simulations hydrologiques rapidement et d'apporter des réponses sous forme d'ordres de grandeurs à des questions sur l'hydrologie des bassins versants.

CACTUS s'adresse à deux types de public :

- aux acteurs des bassins versants pour accompagner la concertation et la co-construction de solutions collectives. CACTUS permet de tester très rapidement des scénarios d'aménagement sur un cas simplifié et pourrait être utilisé en début de projet pour explorer diverses stratégies territoriales d'adaptation au changement climatique, puis déterminer celles qui seront retenues pour la simulation de projections hydrologiques avec un modèle plus détaillé du bassin versant étudié ;
- au grand public et aux étudiants pour faire de la médiation scientifique et de la pédagogie sur la réponse hydrologique des bassins versants face à des influences anthropiques (changement climatique, gestion du territoire, usages de l'eau).

## 2 DESCRIPTION DE L'INTERFACE

### 2.1 Fonctionnement général

CACTUS est une interface graphique interactive développée en RShiny permettant de réaliser des simulations avec le modèle hydrologique J2000 (Krause 2002). Ce modèle hydrologique permet de représenter de manière spatialisée les processus hydrologiques naturels (interception de la pluie par la végétation, fonte de la neige, infiltration dans le sol, évapotranspiration, percolation dans la nappe) et les transferts latéraux (ruissellement, écoulements de subsurface, écoulements souterrains, écoulements dans le réseau de rivières). Le modèle J2000 permet également de prendre en compte les usages anthropiques de l'eau dans la modélisation grâce à des modules permettant de représenter les barrages, les dérivations, les prélèvements d'eau (souterrains ou en rivière) pour l'eau potable et l'irrigation (Branger et al., 2016, Branger et al., 2023).

Dans sa version actuelle, l'interface CACTUS permet via son interface de :

- Définir les caractéristiques d'un bassin versant virtuel: surface du bassin, topographie, types d'occupation des sols, types de sols, aquifères, et son climat. Afin de simplifier la construction du modèle numérique du bassin versant et réduire les temps de calcul, seuls la forme du bassin versant modélisé dans CACTUS, son maillage en unités hydrologiques homogènes (HRU), ainsi que la forme de son réseau de rivière sont prédéfinies et non modifiables. La Figure 1 montre un exemple de la configuration de l'occupation des sols via l'interface CACTUS.
- Exécuter des simulations avec le modèle hydrologique J2000. Les simulations sont réalisées sur la période 1981-2020, incluant 10 ans d'initialisation, en utilisant les données SAFRAN (Vidal et al., 2010) pour le forçage du modèle.
- Visualiser les résultats des simulations. L'espace de visualisation permet de comparer jusqu'à 4 scénarios à l'échelle du bassin entier et sur 3 sous-bassins. L'interface propose de visualiser des résultats portant sur le climat, le régime hydrologique, les contributions aux écoulements (répartition entre les écoulements de ruissellement, subsurface et souterrain), la variation saisonnière des stocks d'eau (neige, eau dans le sol et dans les nappes), le niveau de stress hydrique, les valeurs de haut et bas débits (QMNA et VCN3).

L'utilisateur.rice peut réutiliser ses configurations initiales, puis modifier des caractéristiques du bassin pour simuler des scénarios. Ainsi, il est possible de réaliser des scénarios de changement climatique en modifiant la température moyenne ou saisonnière, ou en modifiant le cumul de précipitations annuel ou bien le nombre moyen de jours annuel avec précipitations. Il est également possible de simuler des scénarios de gestion de territoire en modifiant les occupations des sols (par exemple, en remplaçant des champs cultivés par des forêts, en augmentant la superficie des zones urbaines ou encore en changeant de type de culture).

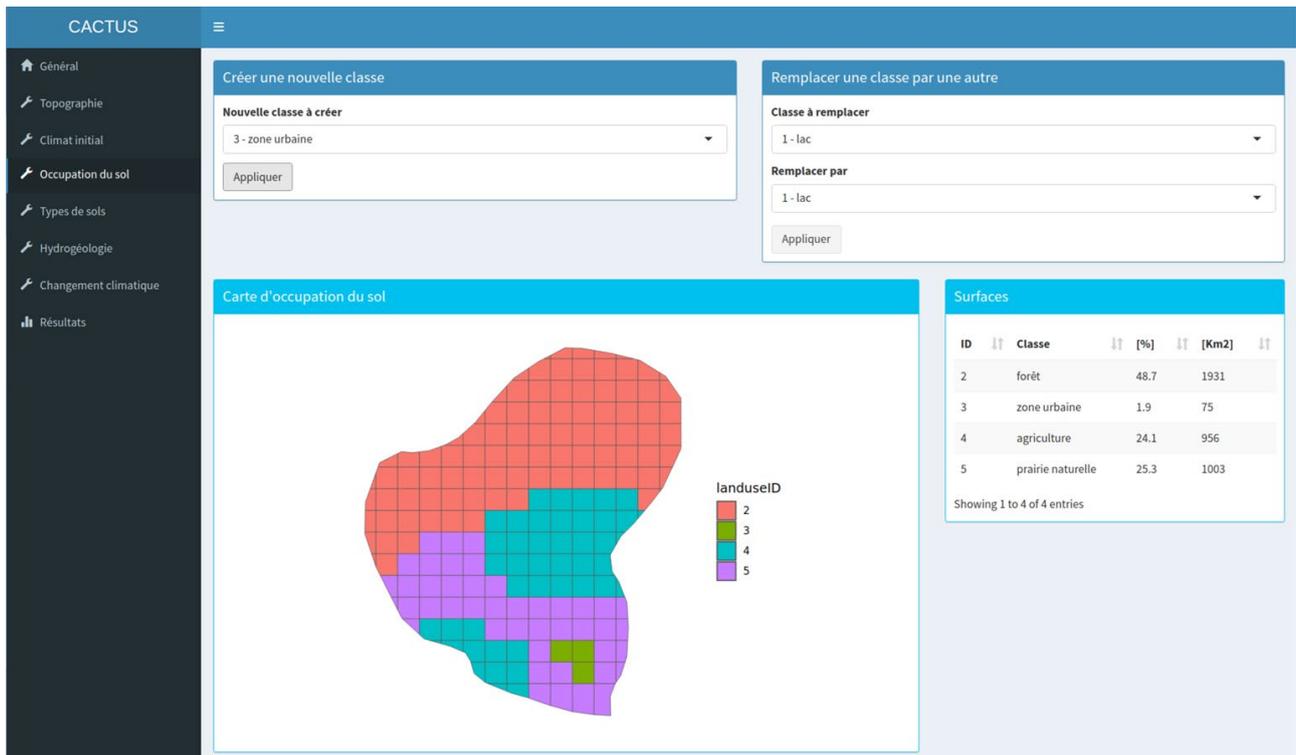


Figure 1: Personnalisation des types d'occupation des sols

## 2.2 Représentation du climat et des caractéristiques du bassin

Pour permettre une interactivité de l'outil CACTUS, des simplifications de la paramétrisation du climat et des caractéristiques du bassin versant ont été apportées par rapport au modèle original J2000.

Premièrement, un module de calcul de l'évapotranspiration de référence avec la formule de Oudin (Oudin 2006) est ajouté au modèle J2000 et vient remplacer le calcul de l'évapotranspiration par la formule de Penmann-Monteith (Allen et al., 1998) utilisée traditionnellement dans la modélisation avec J2000. La formule de Oudin, qui ne dépend que de la température et de la latitude permet de simuler plus facilement des scénarios de changement climatique que la formule de Penmann-Monteith qui nécessite d'autres variables telles que le rayonnement, l'humidité et la vitesse du vent.

Deuxièmement, afin de réduire la quantité de données climatiques à stocker dans la plateforme CACTUS, les données de forçage climatique du bassin versant à modéliser sont réestimées à partir des séries temporelles de températures et précipitations issues de 90 mailles SAFRAN, uniformément réparties sur le territoire de la France hexagonale. Les températures et précipitations de la maille (parmi les 90 mailles retenues) la plus proche de la localisation réelle du bassin à modéliser sont utilisées. Les températures sont régionalisées dans le bassin versant avec un gradient de température fixe de  $-0.0065^{\circ}\text{C}/\text{m}$ . Les précipitations sont considérées comme spatialement uniformes dans le bassin, seul un facteur de correction est appliqué afin de garantir une précipitation annuelle moyenne conforme à celle du bassin réel.

Troisièmement, les classes et les valeurs des paramètres d'occupation du sol, de propriété des sols, et de propriété des aquifères sont prédéfinies et non modifiables. La version actuelle de CACTUS propose 17 classes d'occupation des sols (dont 9 classes de types de cultures), 12 textures et 5 profondeurs de sols, et 7 classes d'aquifères. Les valeurs des paramètres sont issues de bases de données telles que ECOCLIMAP (Faroux et al., 2013) pour le Leaf Area Index (LAI), FAO (Allen et al., 1998) pour les coefficients culturaux, ou encore les paramètres de Van Genuchten de Carsel et Parrish (1988) pour les propriétés hydrauliques des sols.

## 3 ÉVALUATION DE CACTUS PAR COMPARAISON AVEC D'AUTRES MODELES HYDROLOGIQUES

Une première analyse a été réalisée pour étudier le réalisme des simulations hydrologiques produites par l'interface CACTUS. Pour cela, le bassin versant de l'interface CACTUS a été configuré pour obtenir des caractéristiques similaires à celles du bassin versant de l'Albarine à Saint-Rambert-en-Bugey (211 km<sup>2</sup>). La simulation obtenue est ensuite comparée aux débits observés, ainsi qu'aux débits simulés avec 2 autres modèles J2000 intégrant le sous-bassin de

l'Albarine :

- le modèle du bassin de l'Ain « J2K\_Ain », spécifiquement construit et calibré pour simuler les débits de l'Albarine (Mimeau et al., 2024). J2K\_Ain est forcé avec la réanalyse SAFRAN, puis une seconde fois avec la réanalyse ERA5land (Muñoz-Sabater et al., 2021) pour comparer CACTUS à des simulations utilisant différents forçages climatiques.
- le modèle du bassin du Rhône « J2K\_Rhône », caractérisé par un maillage moins dense que J2K\_Ain, mais utilisé dans le cadre du projet Explore 2 pour simuler des projections hydrologiques futures dans les sous-bassins du Rhône (Sauquet et al., 2024).

Le régime hydrologique simulé par CACTUS présente une bonne concordance avec le régime hydrologique observé et les régimes hydrologiques simulés par les autres modèles J2000. Ce résultat pour le bassin de l'Albarine montre que la représentation simplifiée du bassin versant proposée par CACTUS permet de simuler le fonctionnement hydrologique général d'un bassin versant de manière très efficace et relativement précise.

La présentation montrera les résultats d'une évaluation plus approfondie de CACTUS portant sur un ensemble de bassins versants présentant des caractéristiques hydro-climatiques variées, et en intégrant une plus grande variété de modèles hydrologiques. CACTUS sera également évalué sur sa capacité à reproduire les tendances hydrologiques futures simulées par les modèles hydrologiques du projet Explore 2 (Evin et al., 2024).

## BIBLIOGRAPHIE

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., and Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56, Fao, Rome, <http://www.fao.org/docrep/x0490e/x0490e00.htm>
- Branger, F., Gouttevin, I., Tilmant, F., Cipriani, T., Barachet, C., Montginoul, M., Le Gros, C., Sauquet, E., Braud, I., Leblois, E. (2016). Modélisation hydrologique distribuée du Rhône. [Rapport de recherche] Irstea. <https://hal.inrae.fr/hal-02605058v1/file/pub00051555.pdf>
- Branger, F., Bonneau, J., Pellerin, N., Le Coz, J. (2023). Modélisation prospective des transferts hydrologiques et des débits : Résultats des scénarios simulés avec le modèle J2000-Rhône. Rapport de recherche INRAE. <https://hal.science/hal-04228411>
- Carsel, R. F., Parrish, R. S. (1988). Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics. Water resources research. <https://doi.org/10.1029/WR024i005p00755>
- Évin, G., Hingray, B., Reverdy, A., Ducharne, A., Sauquet, É. (2024). Ensemble de projections Explore2 : Changements moyens et incertitudes associées. Recherche Data Gouv, V2. <https://doi.org/10.57745/KWH320>
- Faroux, S., Kaptué Tchuenté, A., Roujean, J.-L., Masson, V., Martin, E., and Le Moigne, P. (2013). ECOCLIMAP-II/Europe: A twofold database of ecosystems and surface parameters at 1 km resolution based on satellite information for use in land surface, meteorological and climate models, Geoscientific Model Development. <https://doi.org/10.5194/gmd-6-563-2013>
- Krause, P. (2002). Quantifying the impact of land use changes on the water balance of large catchments using the J2000 model. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C. [https://doi.org/10.1016/S1474-7065\(02\)00051-7](https://doi.org/10.1016/S1474-7065(02)00051-7)
- Mimeau, L., Küenne, A., Branger, F., Kralisch, S., Devers, A., Vidal, J.-P. (2024). Flow intermittence prediction using a hybrid hydrological modelling approach: influence of observed intermittence data on the training of a random forest model. Hydrology and Earth System Sciences. <https://doi.org/10.5194/hess-28-851-2024>
- Muñoz-Sabater, J., Dutra, E., Agustí-Panareda, A., Albergel, C., Arduini, G., Balsamo, G., Boussetta, S., Choulga, M., Harrigan, S., Hersbach, H., Martens, B., Miralles, D. G., Piles, M., Rodríguez-Fernández, N. J., Zsoter, E., Buontempo, C., Thépaut, J.-N. (2021). ERA5-Land: a state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications, Earth Syst. Sci. Data. <https://doi.org/10.5194/essd-13-4349-2021>
- Oudin L. (2006) Une formule simple d'évapotranspiration potentielle pour la modélisation pluie-débit à l'échelle du bassin versant. La Houille Blanche. <https://doi.org/10.1051/lhb:2006109>
- Sauquet, É., Hérault, L., Bonneau, J., Reverdy, A., Strohmenger, L., Vidal, J.-P. (2024). Diagnostic des modèles hydrologiques : Des données aux résultats. Recherche Data Gouv, V1. <https://doi.org/10.57745/S6PQXD>
- Vidal, J. P., Martin, E., Franchistéguy, L., Baillon, M., & Soubeyrou, J. M. (2010). A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system. International journal of climatology. <https://doi.org/10.1002/joc.2003>