

➤ Guide utilisateur CACTUS

L.Mimeau, L.Héraut, J.-P.Vidal, F.Branger

— Résumé —

CACTUS (CustomizABle CaTchment model for water Use Scenarios) est un modèle hydrologique interactif et à visée pédagogique. CACTUS permet de réaliser très rapidement des simulations hydrologiques dans un bassin versant virtuel avec des caractéristiques personnalisables, puis de visualiser et comparer les différents résultats obtenus. Il est ainsi possible de simuler des scénarios de changement climatique ou encore d'occupation des sols et d'analyser l'impact de ces scénarios sur la disponibilité de la ressource en eau dans le bassin versant. L'outil CACTUS s'adresse aux hydrologues pour faciliter la communication auprès d'un public non-expert et (i) mieux faire percevoir la réponse hydrologique des bassins versants à des modifications du climat ou du territoire, (ii) faciliter les échanges lors de projets de co-construction de solutions d'adaptation face au changement climatique, (iii) enseigner le fonctionnement des modèles hydrologiques spatialement distribués. Ce guide explique comment utiliser l'outil CACTUS et donne des informations sur le fonctionnement du modèle hydrologique.

— Table des matières

1	Présentation générale	4
1.1	Modèle hydrologique J2000	4
1.2	Fonctionnement général de l'interface CACTUS	5
2	Configuration du bassin versant	5
2.1	Caractéristiques fixes du bassin versant virtuel	5
2.2	Topographie	7
	Surface	
	Altitudes minimales et maximales	
2.3	Climat présent	8
	Sélection du type de climat	
	Correction des températures par rapport à l'altitude minimale du bassin	
	Correction du cumul annuel de précipitations	
	Régionalisation des variables climatiques dans le bassin versant	
2.4	Occupation des sols	10
	Ajout ou remplacement d'une classe d'occupation du sol	
	Paramètres d'occupation des sols	
2.5	Types de sols	15
	Ajout ou remplacement d'une classe d'occupation du sol	
	Paramètres de sols	
2.6	Aquifères	16
	Ajout ou remplacement d'une classe d'aquifère	
	Paramètres des aquifères	
2.7	Changement climatique	17
	Configuration d'un scénario de changement climatique	
	Détails sur la méthode de perturbation des précipitations	
2.8	Application prepCACTUS pour faciliter la configuration du bassin versant	19
2.9	Importer une configuration	19
3	Lancement d'une simulation J2000	19
4	Visualisation des résultats	19
4.1	Sélection des simulations	20
4.2	Sélection du type de résultat	20
4.3	Sélection du sous-bassin versant	21
5	Simulations et comparaisons de scénarios	21
6	Description détaillée du modèle hydrologique	21
	Bibliographie	23
A	Paramètres fixes du modèle J2000-CACTUS	24

1 Présentation générale

CACTUS est une interface graphique interactive développée en RShiny permettant de réaliser des simulations avec le modèle hydrologique J2000 (Krause, 2002).

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

- définir les caractéristiques d'un bassin versant virtuel: topographie, types d'occupation des sols, types de sols, aquifères, et climat; ou bien de charger une configuration pré-existante,
- exécuter des simulations avec le modèle hydrologique J2000,
- simuler des scénarios de changement climatique ou de changement d'occupation des sols,
- visualiser et comparer les résultats simulés sur le climat, le régime hydrologique, les contributions aux écoulements, la variation saisonnière des stocks d'eau, le niveau de stress hydrique dans le bassin versant.

- [schéma fonctionnement CACTUS J2000](#)
- [conditions d'utilisation / license](#)
- [à but pédagogique uniquement](#)
- [accès en ligne](#)
- [présentation du site web ?](#)
- [ref vers abstract ou article sur l'évaluation de CACTUS](#)

1.1 Modèle hydrologique J2000

J2000 est un modèle hydrologique spatialisé utilisé et co-développé par l'équipe Hydrologie des Bassins Versants (HyBV) de l'unité de recherche INRAE RiverLy (Branger et al., 2013; Branger et al., 2016; Mimeau et al., 2024) ([liste de références à compléter](#)) qui permet de représenter les processus hydrologiques (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) de façon spatialisée.

Le bassin versant est discrétisé en unités hydrologiques homogènes - appelées HRU (Hydrological Response Unit) - sur lesquelles les flux d'eau entre l'atmosphère, la végétation, le sol et la nappe sont calculés (Fig. 1). Les HRUS peuvent être paramétrées indépendamment pour prendre en compte l'hétérogénéité spatiale du bassin versant. Les flux d'eau d'eau sont ensuite transférés latéralement de l'amont vers l'aval jusqu'à être interceptés par le réseau hydrographique qui transfère à son tour les débits vers l'aval jusqu'à l'exutoire du bassin versant.

CACTUS utilise une version de J2000 discrétisée temporellement au pas de temps journalier.

Une description détaillée du modèle J2000 tel qu'implémenté dans CACTUS est présentée en section 6 de ce document.

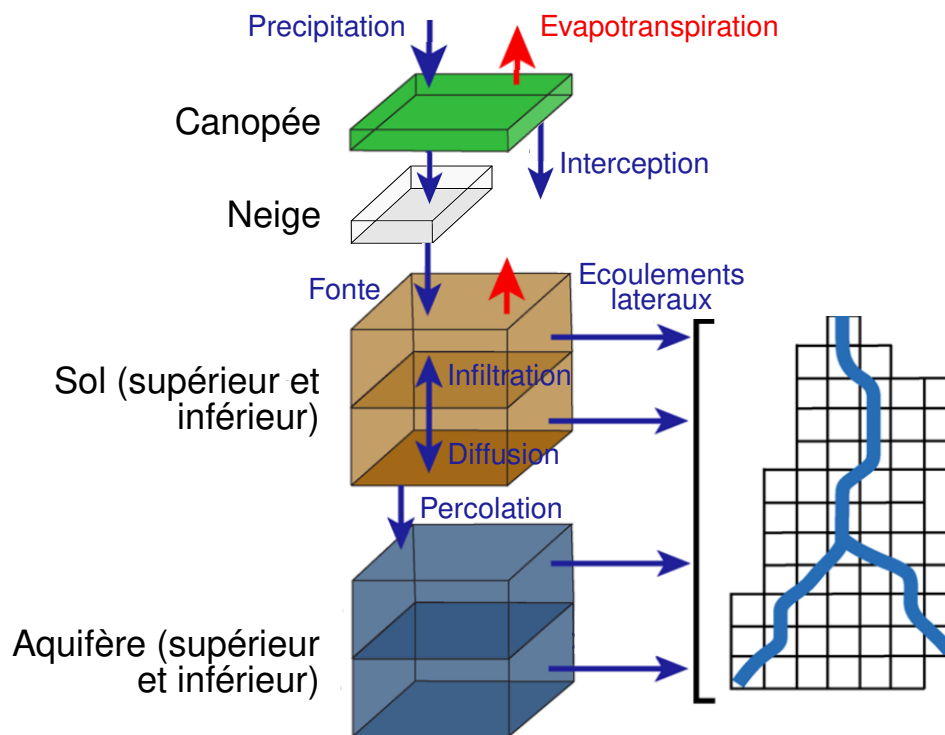


Figure 1. Schéma de fonctionnement du modèle hydrologique spatialement distribué J2000. Adapté de Watson et al., 2021.

1.2 Fonctionnement général de l'interface CACTUS

2 Configuration du bassin versant

2.1 Caractéristiques fixes du bassin versant virtuel

La forme du bassin versant et de son réseau hydrographique est prédéfinie et ne peut pas être modifiée. Le bassin est discrétisé en 185 unités hydrologiques homogènes - appelées HRU (Hydrological Response Unit) - et 14 tronçons de rivières (Fig. 2). La connectivité entre les HRUs et entre les tronçons de rivières est également fixe, autrement dit, la direction des flux d'eau entre l'amont et l'aval ne peut pas être modifiée (Fig. 3).

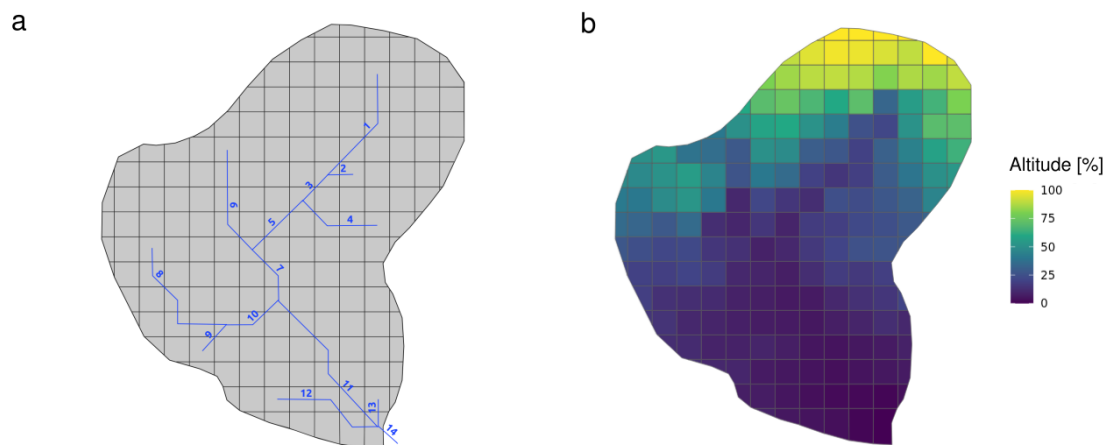


Figure 2. a) Bassin versant CACTUS discrétisé en 185 HRUs et 14 tronçons de rivières. b) Altitudes relatives des HRUS (en %, 0 % et 100 % correspondant respectivement aux altitudes minimales et maximales).

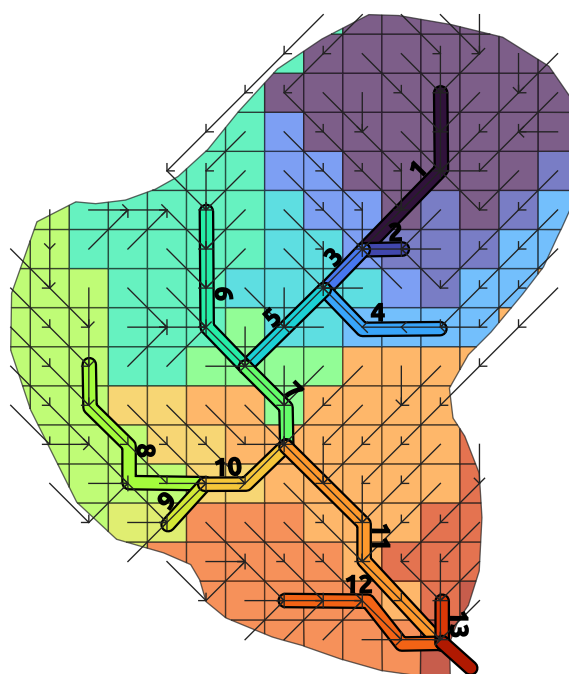


Figure 3. Connectivité entre les HRUs et les tronçons de rivières. Les flèches en ligne fine noire montrent les directions d'écoulements des HRUs. Les lignes épaisses représentent les tronçons de rivières. Les couleurs représentent les tronçons de rivières et leur sous bassin versant - les HRUs d'une même couleur alimentent toutes le même tronçon de rivière. Le numéro du sous-bassin versant est indiqué en gras le long des tronçons de rivières. des petits bugs sur les HRUs au bord du bassin, les connexions ne sont pas très logiques.

L'annexe A présente les valeurs des caractéristiques fixes du réseau de rivières et des paramètres hydrologiques globaux fixes. [bug avec le lien interne vers l'annexe](#)

Il est possible de modifier l'orientation du bassin dans l'onglet "Topographie" en appliquant un angle de rotation puis en cliquant sur le bouton "Rotation" (Fig. 4). Cette ré-orientation du bassin n'a aucune incidence sur la modélisation hydrologique, elle peut simplement être utilisée pour faciliter la configuration du bassin.

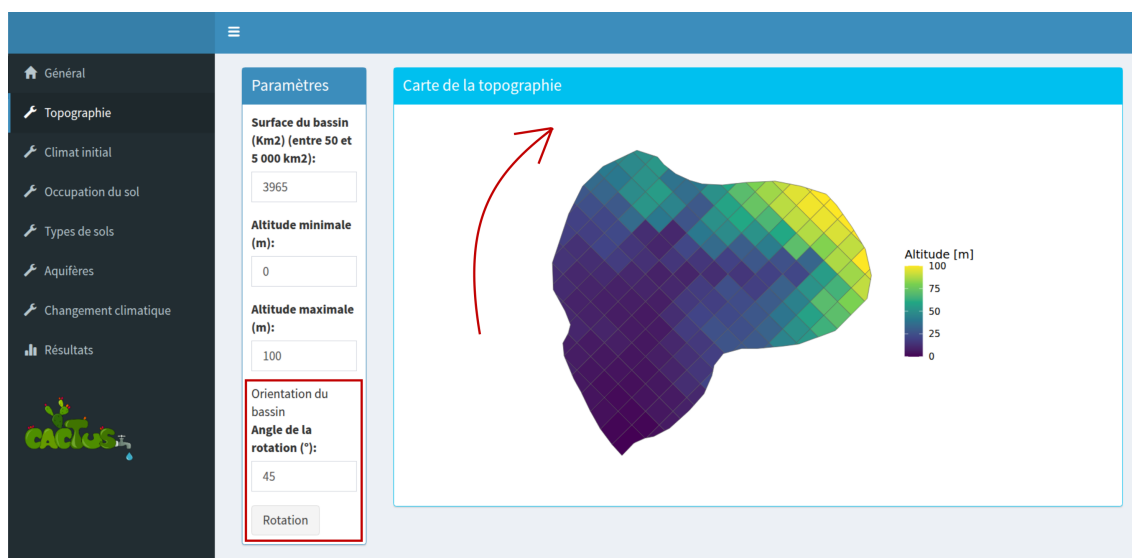


Figure 4. Modification de l'orientation du bassin dans l'onglet "Topographie".

2.2 Topographie

Surface

L'onglet "Topographie" permet de configurer la superficie totale du bassin versant (Fig. 5). CACTUS a été développé pour simuler l'hydrologie de bassins de "moyenne" taille, c'est à dire entre 50 et 5 000 km² environ. En dehors de cette gamme de superficie, les résultats de la modélisation hydrologique risquent d'être moins représentatifs du fonctionnement hydrologiques des bassins versants. En effet, concernant les petits bassins (inférieurs à quelques dizaines de km²) les données climatiques utilisées en entrée (voir section 2.3) ont une résolution spatiale d'environ 64 km² et ne sont pas nécessairement représentative du climat à échelle très locale; et concernant les grands bassins (supérieurs à 5 000 km²), la discrétisation en 185 HRUs risque de ne plus être adaptée pour représenter l'hétérogénéité spatiale du bassin versant.

Par défaut, la surface du bassin est 3 935 km².

La configuration de la superficie totale du bassin permet de recalculer la surface des HRUs, la longueur et la largeur des tronçons de rivières.

Altitudes minimales et maximales

L'onglet "Topographie" permet aussi de configurer les altitudes minimales et maximales du bassin versant (en mètres au-dessus du niveau de la mer) (Fig. 5). La légende de la carte est mise à jour automatiquement lorsque les champs des altitudes minimales et maximales sont modifiées. Cette action modifie uniquement la gamme d'altitudes du bassin. Il n'est pas possible de modifier le relief à l'intérieur du bassin (cf section 2.1 sur la direction des flux latéraux).

Par défaut, l'altitude minimale est 0 m et l'altitude maximale 100 m.

Ces informations servent à recalculer les pentes des HRUs et des tronçons de rivières. Elles sont également utiles pour la régionalisation des températures dans le bassin (voir section 2.3) et peuvent donc indirectement impacter les processus hydrologiques impliquant la température (stockage et fonte de la neige, évapotranspiration) lors de la simulation hydrologique.

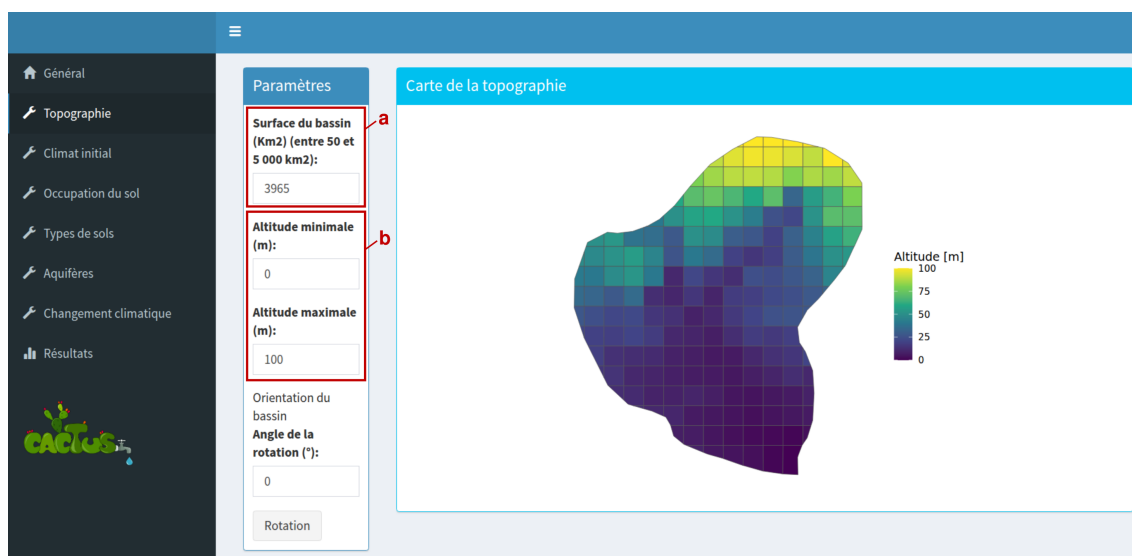


Figure 5. Modification de la superficie (a) et des altitudes minimales et maximales (b) du bassin dans l'onglet "Topographie".

2.3 Climat présent

Sélection du type de climat

L'onglet "Climat initial" permet de configurer le climat en période passée-présente (1980-2021) (Fig. 6). Par défaut, le climat sélectionné est le climat de la ville de Lyon. La carte interactive permet de sélectionner le climat sur une sélection de 90 villes en France. Ces 90 villes sont les chefs-lieu des départements de français métropolitaine. Le fond de la carte est purement indicatif, il permet de localiser les 5 grandes régions climatiques de France.

La sélection d'une des 90 villes permet de configurer les chroniques de précipitations et températures journalières à donner en entrée du modèle J2000. Ces données sont issues de la réanalyse SAFRAN (Vidal et al., 2010) sur la période allant du 01/08/1980 au 31/07/2021. Pour chacune des 90 villes, les données correspondent à la maille Safran contenant la mairie ou l'hôtel de ville.

Dans le modèle J2000, les chroniques de données climatiques de la ville sélectionnées sont affectées à la HRU la plus basse du bassin versant (i.e. à l'exutoire).

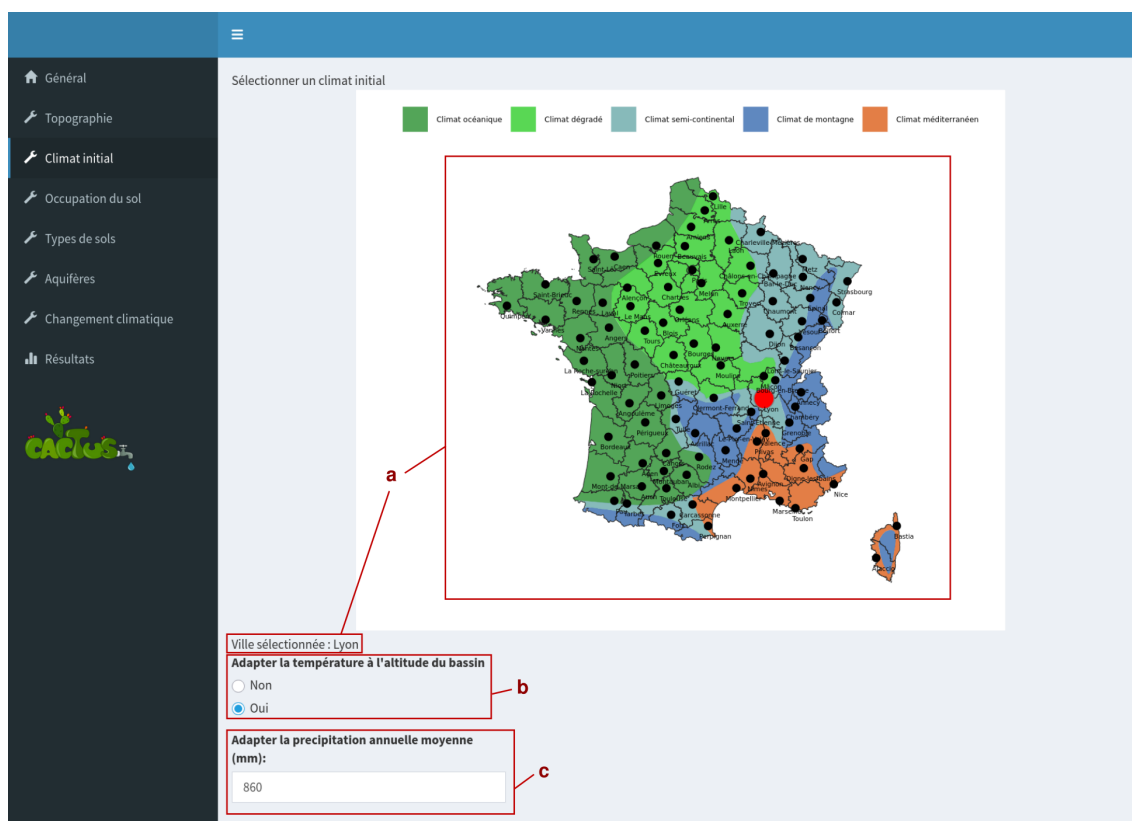


Figure 6. Configuration du climat en période présente (1980-2021). a) Sélection d’une ville qui sera la référence climatique sur la carte interactive. Le nom de la ville sélectionnée s’affiche automatiquement en-dessous la carte. b) Adapter la température à l’altitude du bassin : choisir “Non” pour utiliser sans modification les températures de la ville sélectionnée, choisir “Oui” pour prendre en compte la différence d’altitude entre la ville sélectionnée et l’altitude minimale du bassin (application d’un gradient de température). c) Adapter la précipitation annuelle moyenne : laisser la case vide pour utiliser sans modification les précipitations de la ville sélectionnée, entrer un cumul de précipitation moyen annuel cible pour corriger les précipitations.

Correction des températures par rapport à l’altitude minimale du bassin

Par défaut, la chronique de températures est corrigée en appliquant un gradient de température pour adapter les températures de la ville sélectionnées à l’altitude de l’exutoire du bassin avec la formule :

$$T_{exutoire,j} = T_{maillesafranville,j} + gradT * (z_{exutoire} - z_{maillesafranville}) \quad (1)$$

avec $T_{exutoire,j}$ la température journalière corrigée à l’exutoire du bassin, $T_{ville,j}$ la température journalière de la maille Safran de ville sélectionnée, $z_{exutoire}$ et z_{ville} les altitudes de l’exutoire du bassin et de la maille Safran respectivement, et $gradT$ le gradient de température égal à -0.0065 °C/m.

Il est possible de ne pas corriger la chronique de température en cliquant sur l’option “Non” en-dessous de “Adapter la température à l’altitude du bassin”. La chronique non modifiée de températures de la maille Safran de la ville sélectionnée est alors directement utilisées dans le modèle J2000.

Correction du cumul annuel de précipitations

Il est possible d’imposer un cumul annuel moyen de précipitation. Il faut pour cela indiquer le cumul de précipitation dans le champs “Adapter la précipitation annuelle moyenne (mm)”. Cette action permet de conserver la variabilité temporelles des précipitation de la maille Safran, mais modifie les cumuls

journaliers selon la formule :

$$P_{exutoire,j} = P_{maillesafranville,j} * \frac{P_{exutoire,moyannuel}}{P_{maillesafranville,moyannuel}} \quad (2)$$

avec $P_{exutoire,j}$ la précipitation journalière corrigée à l'exutoire du bassin, $P_{maillesafranville,j}$ la précipitation journalière de la maille Safran, $P_{exutoire,moyannuel}$ le cumul annuel moyen de précipitation renseigné dans l'interface CACTUS, et $P_{maillesafranville,moyannuel}$ le cumul annuel moyen de précipitation de la maille Safran.

Si le champs est laissé vide, alors les précipitations de la maille Safran ne sont pas modifiées et utilisées telles quelles dans le modèle J2000.

Régionalisation des variables climatiques dans le bassin versant

Dans le modèle J2000-CACTUS, les précipitations sont considérées comme spatialement uniformes dans le bassin.

Les températures sont recalculées sur chaque HRU à partir de la maille à l'exutoire du bassin en appliquant un gradient de températures de -0.0065 °C/m, sur le même principe que la formule (1).

2.4 Occupation des sols

Ajout ou remplacement d'une classe d'occupation du sol

L'onglet "Occupation des sols" permet de configurer l'occupation des sols de chaque HRU du bassin versant (Fig. 7). Dans la version actuelle 17 types d'occupation des sols sont disponibles dans l'interface CACTUS. (Table 1). Par défaut, le bassin est entièrement configuré avec la classe "Roche - pas ou peu de végétation".

La Figure 8 montre comment créer une nouvelle classe d'occupation du sol. Dans l'encadré "Créer une nouvelle classe", sélectionner dans le menu déroulant la classe à créer. Sélectionner ensuite sur la carte d'occupation des sols les HRUs sur lesquelles la nouvelle classe sera affectée. Cette sélection peut se faire soit en cliquant directement sur les HRU à modifier (les HRU sélectionnées se colorent alors en rouge), soit en utilisant l'outil "lasso selection" - en haut à droite de la carte - qui permet de sélectionner automatiquement toutes les HRUS contenues à l'intérieur d'une zone dessinée manuellement (maintenir le bouton de la souris enfoncé pendant le dessin de la zone). Une fois les HRUs sélectionnées, cliquer sur le bouton "Appliquer" de l'encadré "Créer une nouvelle classe". Cette opération est à répéter pour chaque nouvelle classe d'occupation du sol à ajouter dans le bassin.

Une autre manière de modifier l'occupation du sol du bassin est de remplacer une classe par une autre (encadré en haut à droite de l'écran). Pour cela il faut sélectionner dans le menu déroulant "Classe à remplacer" la classe du bassin à remplacer, puis dans le menu déroulant "Remplacer par" la nouvelle classe à affecter en remplacement, et enfin cliquer sur le bouton "Appliquer".

Au clic sur un des deux boutons "Appliquer", la carte et le tableau "Surface" se mettent automatiquement à jour. Le tableau "Surfaces" permet de synthétiser les surfaces du bassin occupées par chaque classe d'occupation des sols.

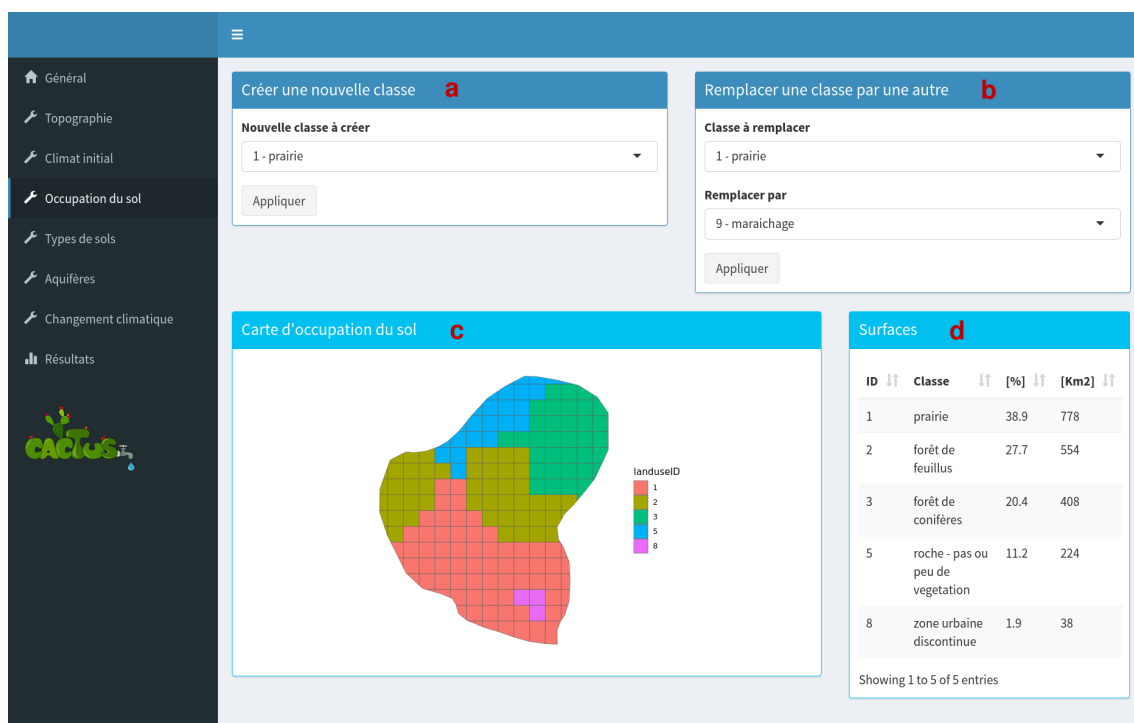
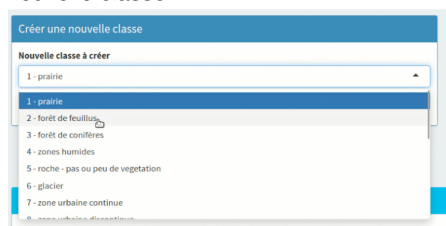
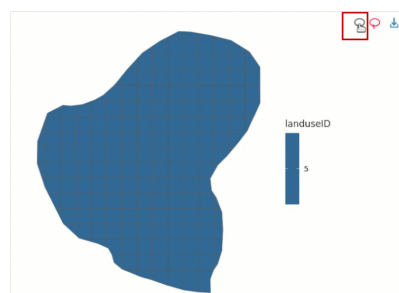


Figure 7. Configuration de l'occupation des sols dans l'onglet "Occupation des sols". a et b) Sélection des classes à créer ou à remplacer. c) Carte interactive pour sélectionner les HRUs à modifier et visualiser la mise à jour des occupation des sols. d) Tableau de synthèse des classes d'occupation des sols configurées dans le bassin. La Figure 8 détaille la méthode pour créer une nouvelle classe.

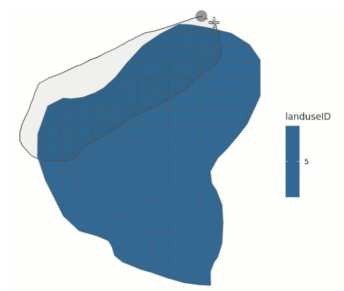
1. Sélectionner une classe à créer dans le menu d'éroulant de la boîte "Créer une nouvelle classe".



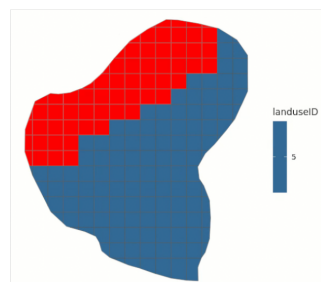
2. Sélectionner le lasso de gauche sur la carte interactive.



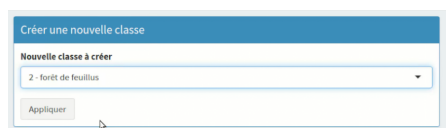
3. Entourer les HRUs à modifier avec l'outil lasso (maintenir le bouton de la souris enfoncé).



4. Une fois la souris relâchée, les HRUs sélectionnées se colorent en rouge.



5. Cliquer sur le bouton "Appliquer".



6. La carte et le tableau sont mis à jour automatiquement avec la nouvelle configuration.



Figure 8. Création d'une nouvelle classe d'occupation des sols dans le bassin.

Paramètres d'occupation des sols

A chaque classe d'occupation des sols sont affectés des paramètres hydrologiques du modèle J2000 suivants :

- Indice de surface foliaire LAI (Leaf Area Index) mensuels (12 valeurs) : ce paramètre intervient lors du calcul de l'interception de la précipitation par la végétation. Plus la valeur de LAI est élevée, plus la précipitation sera interceptée par la canopée (puis évaporée) et moins la précipitation atteindra la surface du sol (pour ensuite s'infiltrer ou ruisseler). [insérer ref LAI](#)
- Coefficients culturels mensuels Kc (12 valeurs) : il s'agit d'un coefficient appliqué à la demande en évaporation de l'atmosphère pour calculer l'évapotranspiration potentielle (ETP). Plus cette valeur est

élevée, plus la demande en évapotranspiration des plantes est élevée. Les valeurs utilisées dans CACTUS sont issues de de la FAO (Allen et al., 1998).

- La profondeur racinaire : ce paramètre intervient lors du calcul de l'évapotranspiration. Pour répondre à la demande en ETP, les plantes puisent l'eau dans le sol entre la surface et la profondeur racinaire. Plus la profondeur racinaire est élevée, plus les plantes ont accès à une quantité d'eau importante pour répondre à la demande en ETP. [insérer ref](#)
- Un coefficient d'imperméabilisation : ce paramètre intervient lors du calcul de l'infiltration dans le sol. Plus ce paramètre est élevé, moins il y a d'infiltration et plus il y a de ruissellement de surface. [insérer ref](#)
- Des taux maximum d'infiltration en saison d'été, en saison d'hiver et en présence de neige au sol : ces 3 paramètres représentent un seuil d'infiltration. Lors d'évènement de précipitation intense, si l'intensité de la pluie excède le taux maximum d'infiltration alors l'excès de pluie est directement converti en ruissellement de surface, même si le sol n'est pas saturé. [insérer ref](#)

Les valeurs des paramètres J2000-CACTUS pour les 17 classes d'occupation du sol sont indiquées dans les Tables 1, 2 et 3.

N°	Nom	LAI_1	LAI_2	LAI_3	LAI_4	LAI_5	LAI_6	LAI_7	LAI_8	LAI_9	LAI_{10}	LAI_{11}	LAI_{12}
1	Prairies	1	1.4	1.8	2.3	3	3	2.9	2.8	2.7	2.4	1.8	1.2
2	Forêt de feuillus	1	1.60	2.20	2.70	4.40	4.50	4.40	4.10	4.00	3.30	2.30	1.20
3	Forêt de conifères	2	2.60	2.90	3.20	4.20	4.50	4.40	4.20	3.60	3.20	2.90	2.00
4	Zones humides	1	1.3	1.5	1.6	2.7	3	3	2.9	2.6	2	1.4	1
5	Roche	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
6	Glaciers	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	Tissu urbain continu	1	1.2	1.5	1.8	2	1.9	1.8	1.8	1.8	1.7	1.3	1.1
8	Tissu urbain discontinu	1	1.3	1.6	1.8	2	2	1.9	1.9	1.9	1.8	1.5	1.1
9	Maraîchage	1.4	2.8	2.04	0.5	0.9	2.11	2.55	1.8	0.51	2.03	2.9	1.07
10	Vergers	1.0	1.4	1.8	2	3	3	3	2.8	2.8	2.2	1.8	1.2
11	Maïs	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	1.16	2.97	3	2.72	1.83	0.5	0.5
12	Blé dur	0.5	0.5	0.9	1.28	1.7	2.3	3	3	0.5	0.5	0.5	0.5
13	Tournesol	0.5	0.5	0.5	0.5	1.7	2.8	3	3	2.74	2	0.8	0.5
14	Vigne	1	2	2.4	3	4	4	4	3.8	3.8	3	1.8	1.2
15	Protéagineux	0.5	0.5	1.8	2.85	3	2.95	2.8	2.2	1.3	0.8	0.5	0.5
16	Riz	0.1	0.6	0.9	1	1.5	3.3	4	3.8	2.9	1.3	0.3	0.2
17	Oliviers	2.6	2.8	3	3	2.8	2.4	2.2	2	2	2.2	2.2	2.4

Table 1. Indices de surface foliaires (LAI) des 12 mois de l'année pour les 17 classes d'occupation des sols représentées dans CACTUS d'après [ref](#).

N°	Nom	Kc_1	Kc_2	Kc_3	Kc_4	Kc_5	Kc_6	Kc_7	Kc_8	Kc_9	Kc_{10}	Kc_{11}	Kc_{12}
1	Prairies	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	Forêt de feuillus	1	1	1	1.03	1.18	1.2	1.2	1.2	1.18	1.03	1	1
3	Forêt de conifères	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8	1	1	1	0.92	0.92	0.92	0.92
4	Zones humides	0.55	0.55	0.55	0.649	1.188	1.265	1.265	1.265	1.177	0.627	0.55	0.55
5	Roche	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
6	Glaciers	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	Tissu urbain continu	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
8	Tissu urbain discontinu	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
9	Maraîchage	0.976	0.974	0.976	0.95	1.006	1.094	1.095	0.941	0.886	0.95	0.969	0.998
10	Vergers	0.45	0.45	0.463	0.632	0.85	0.95	0.95	0.948	0.797	0.66	0.596	0.532
11	Maïs	0.717	0.749	0.782	0.8	0.95	1.185	1.199	0.918	0.7	0.7	0.7	0.7
12	Blé dur	0.6	0.6	0.6	0.6	0.724	1.123	1.091	0.632	0.6	0.6	0.6	0.6
13	Tournesol	0.467	0.598	0.729	0.998	1.15	0.943	0.595	0.541	0.511	0.479	0.447	0.416
14	Vigne	0.37	0.37	0.37	0.37	0.49	0.734	0.85	0.809	0.663	0.511	0.427	0.389
15	Protéagineux	0.5	0.5	0.538	1.013	1.148	1.093	1.046	1	0.956	0.911	0.867	0.822
16	Riz	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.128	1.2	1.199	1.026	0.9	0.9	0.9
17	Oliviers	0.6	0.55	0.55	0.6	0.6	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65

Table 2. Coefficients culturaux (Kc) des 12 mois de l'année pour les 17 classes d'occupation des sols représentées dans CACTUS d'après Allen et al., 1998.

N°	Nom	Prof. Racinaire	Coeff. Imperm.	MaxInfEte	MaxInfHiver	MaxInfNeige
1	Prairies	10	0.05	40	50	20
2	Forêt de feuillus	12.5	0.05	80	100	40
3	Forêt de conifères	15	0.05	80	100	40
4	Zones humides	10	0.05	80	100	40
5	Roche	10	0.45	40	50	20
6	Glaciers	0	0.95	40	50	20
7	Tissu urbain continu	7.5	0.80	40	50	20
8	Tissu urbain discontinu	7.5	0.45	40	50	20
9	Maraîchage	9	0.25	40	50	20
10	Vergers	15	0.25	40	50	20
11	Maïs	13.5	0.25	40	50	20
12	Blé dur	12.5	0.25	40	50	20
13	Tournesol	11.5	0.25	40	50	20
14	Vigne	15	0.25	40	50	20
15	Protéagineux	8	0.25	40	50	20
16	Riz	7.5	0.25	40	50	20
17	Oliviers	15	0.25	40	50	20

Table 3. Autres paramètres d'occupation du sol pour les 17 classes d'occupation des sols représentées dans CACTUS d'après ref. Prof. Racinaire: profondeur racinaire (en dm ???), Coeff. Imperm. : coefficient d'imperméabilité, MaxInfEte : taux maximum d'infiltration pendant l'été (mm/jour), MaxInfHiver : taux maximum d'infiltration pendant l'hiver (mm/jour), MaxInfNeige : taux maximum d'infiltration lorsqu'il y a de la neige au sol (mm/jour).

2.5 Types de sols

Ajout ou remplacement d'une classe d'occupation du sol

L'onglet "Types de sols" permet de configurer les propriétés des sols de chaque HRU du bassin versant. Dans la version actuelle 60 classes de sols sont disponibles dans l'interface CACTUS. Une classe de sol est définie par la texture du sol (12 textures possibles, cf Table 4) et la profondeur du sol (5 profondeurs possibles : 20, 50, 80, 110, et 250 cm). Par défaut, le bassin est entièrement configuré avec la classe "Sable - 20 cm".

La configuration des types de sols se réalise de la même manière que pour les occupation du sol (cf section 2.4).

Paramètres de sols

Les sols sont caractérisés par leur profondeur (directement paramétrée par l'utilisateur.ice), la capacité d'air *Aircap* et la capacité au champs *FC* définies par tranche de 10 cm de profondeur (cf Table 4). La capacité au champs *FC* désigne la capacité de rétention maximale en eau du sol, c'est-à-dire la quantité d'eau retenue par le sol après écoulement par gravité de l'eau excédentaire qui circule dans les macropores. La capacité d'air *Aircap* désigne le quantité d'eau qui peut être stockée dans les macropores puis s'écouler par gravité. *Aircap* est calculé comme la différence entre le taux de saturation du sol et sa capacité au champs.

Dans le modèle J2000-CACTUS, les valeurs des paramètres *Aircap* et *FC* sont uniformes sur la profondeur du sol.

Texture	Aircap/10cm	FC/10cm
Sable	38.07	4.93
Sable limoneux	33.9	7.0
Limon sableux	28.82	12.18
Limon fin	20.98	24.02
Limon très fin	20.18	25.82
Limon	26.46	16.54
Limon argilo-sableux	22.05	16.95
Limon argileux fin	9.17	33.83
Limon argileux	14.03	26.97
Argile sableuse	11.28	26.72
Argile limoneuse	2.3	33.7
Argile	3.31	34.69

Table 4. Paramètres des sols J2000-CACTUS pour les 12 textures de sols. Aircap/10cm : capacité d'air du sol par tranche de 10 cm de profondeur (en mm); FC/10cm : capacité au champs du sols par tranche de 10 cm de profondeur (en mm) d'après Tafasca, 2020 et Carsel and Parrish, 1988.

2.6 Aquifères

Ajout ou remplacement d'une classe d'aquifère

L'onglet "Aquifères" permet de configurer les propriétés hydro-géologiques de chaque HRU. Dans la version actuelle 7 classes d'aquifères sont disponibles dans l'interface CACTUS (cf Table 5). Par défaut, le bassin est entièrement configuré avec la classe "Karst pur".

La configuration des types de sols se réalise de la même manière que pour les occupation du sol (cf section 2.4).

Paramètres des aquifères

Les aquifères sont représentés par J2000 par un modèle de réservoirs avec deux paramètres : la capacité maximale de stockage du réservoir souterrain et un paramètre k de rétention du réservoir. La capacité maximale de stockage renseigne sur le volume maximal d'eau pouvant être stocké dans la nappe, et le paramètre k de rétention renseigne sur la réactivité de la nappe : une valeur faible indique un écoulement souterrain rapide vers l'aval, alors qu'une valeur élevée caractérise plutôt les nappes avec écoulement lent.

N°	Nom	max	k
1	Karst pur	200	3
2	Karst mixte	170	10
3	Sédimentaire semi-perméable	100	8
4	Sédimentaire aquifère	400	80
5	Socle à plat	150	30
6	Socle en pente	70	20
7	Montagne	20	10

Table 5. Paramètres hydrogéologiques pour les 7 types d'aquifères représentés dans CACTUS, d'après Branger et al., 2021. max : capacité de stockage maximum du réservoir (mm), k: coefficient de rétention du réservoir (jour⁻¹).

2.7 Changement climatique

Une fois que la topographie, le climat présent, l'occupation des sols, les types de sols et aquifères sont configurés, il est conseillé de lancer une première simulation sans changement climatique (c'est-à-dire avec le climat défini dans l'onglet "Climat présent") pour avoir une simulation de référence (cf section 3).

Configuration d'un scénario de changement climatique

Une fois cette simulation de référence réalisée, l'onglet "Changement climatique" permet de configurer un scénario de changement climatique dans le bassin en appliquant des perturbations sur les températures et les précipitations du climat présent. Ces perturbations peuvent être appliquées soit de manière uniforme à l'échelle annuelle (onglet "moyen annuel", 1 valeur par paramètre), soit à l'échelle saisonnière (onglet "saisonnier", 4 valeurs par paramètre) (Fig. 9).

- Changement moyen de température (°C) : delta de température (positif ou négatif) appliqué sur la chronique des températures journalières.
- Changement du nombre de jours avec précipitation : nombre de jours moyen avec précipitation à ajouter (valeur positive) ou retirer (valeur négative) de la chronique des précipitations journalières.
- Changement moyen de précipitation (%) : cumul de précipitation à ajouter (valeur positive) ou à retirer (valeur négative) par rapport au cumul en climat présent.

La fenêtre "Projections climatique" à droite de l'écran permet d'accéder à l'atlas interactif du GIEC ou aux projections climatiques DRIAS de Météo-France pour obtenir des ordres de grandeurs de changements de températures et de précipitations projetés à différents horizons temporels et pour différents scénarios en France.

Bug dans l'appli : quand on clique sur le lien du GIEC ou de Drias, l'appli revient sur l'onglet "Général".

a moyen annuel saisonnier

Paramètres changement climatique

Changement annuel moyen de température (°C) :

4

Changement annuel moyen de précipitation (%) :

5

Changement du nombre annuel de jours avec précipitation :

-10

Projections climatiques

[Cliquez ici pour voir les projections du GIEC](#)

[Cliquez ici pour voir les projections du projet Explore2 \(France\)](#)

b moyen annuel saisonnier

Paramètres changement climatique

Changement moyen de température (°C)	Changement moyen de précipitation (%)	Changement moyen du nombre de jours avec précipitation
Décembre - Février:	Décembre - Février:	Décembre - Février:
2.5	10	5
Mars - Mai:	Mars - Mai:	Mars - Mai:
3.1	6	2
Juin - Août:	Juin - Août:	Juin - Août:
5.6	-15	-14
Septembre - Novembre:	Septembre - Novembre:	Septembre - Novembre:
3.8	5	-3

Projections climatiques

[Cliquez ici pour voir les projections du GIEC](#)

[Cliquez ici pour voir les projections du projet Explore2 \(France\)](#)

Figure 9. Création d'un scénario de changement climatique avec des perturbations moyennes annuelles (a) ou saisonnières (b).

Détails sur la méthode de perturbation des précipitations

Si la valeur du paramètre "changement du nombre de jours avec précipitation" est négative, la méthode suivante est appliquée pour retirer des jours avec précipitations.

Le facteur f est calculé comme le rapport entre le nombre de jours avec précipitations cible et le nombre de jours initial. Ce facteur permet de définir la proportion de jours à conserver dans le processus de modification des précipitations. Les jours présentant des précipitations strictement positives sont ensuite identifiés à partir du jeu de données climatique initial. Parmi ces jours pluvieux, une sélection aléatoire est réalisée de manière à imposer des précipitations nulles sur une fraction des événements de précipitation correspondant à $1-f$.

Si la valeur du paramètre "changement du nombre de jours avec précipitation" est positive, la méthode suivante est appliquée pour ajouter des jours avec précipitations.

Le facteur f_{Dry} est calculé comme le rapport entre le nombre de jours sans précipitations cible et le nombre de jours initial. Parmi les jours sans précipitation du jeu de données climatiques initial, une sélection aléatoire est réalisée sur une fraction correspondant à $1-f_{Dry}$. Ces jours sélectionnés sont en-

suite convertis en évènement pluvieux en affectant aléatoirement des cumuls de précipitations issus des évènements pluvieux du climat initial.

Les sélections aléatoires sont réalisées avec la fonction `sample.split` du package R `caTools` (Tuszynski, 2024).

Un coefficient est ensuite appliqué sur la série de précipitations journalières obtenues après modification du nombre de jours avec précipitation afin d'obtenir un cumul moyen concordant avec la variation de cumul imposée dans le paramètre "changement moyen de précipitation". Ce coefficient correspond au rapport entre l'intensité journalière moyenne des précipitations cible (i.e. le cumul moyen de précipitation divisé par le nombre moyen de jour avec précipitation) et l'intensité journalière moyenne après modification du nombre de jours pluvieux.

2.8 Application prepCACTUS pour faciliter la configuration du bassin versant

Une application RShiny complémentaire nommée prepCACTUS (ajouter ref vers user guide prepCACTUS) a été développée dans le but de faciliter la phase de configuration du bassin versant virtuel. prepCACTUS permet de récupérer facilement, à partir de bases de données disponibles, des informations concernant le climat, la gamme d'altitude, les types d'occupation du sol, types de sols, la géologie, et changements projetés des températures et précipitations à horizon 2050 et 2100 pour tous types de bassins versants localisés en France métropolitaine. prepCACTUS permet ainsi de donner au bassin versant virtuel CACTUS des caractéristiques similaires à celles d'un bassin versant réel du territoire français.

2.9 Importer une configuration

Lorsqu'une simulation est lancée (cf section 3, la configuration du bassin est automatiquement enregistrée dans un fichier nommé "config_app.RData". Ce fichier contient les informations concernant les choix de paramétrisation (Topographie, Climat présent, Occupation des sols, Types de sols, Aquifères, Changement climatique).

Afin de faciliter la paramétrisation du bassin de J2000-CACTUS, il est possible d'importer une configuration pré-établie. Dans l'onglet "Général", la barre "Importer une configuration" permet de charger le fichier "config_app.RData" d'une précédente simulation. Pour récupérer ce fichier, il faut aller dans le répertoire "J2000/models/" puis dans le répertoire correspondant au modèle à récupérer, le nom de ce répertoire doit commencer par "J2K_".

Par exemple, en chargeant le fichier "config_app.RData" du répertoire "J2000/models/J2K_Ardeche_present", il est ainsi possible de récupérer le bassin CACTUS paramétrisé avec des caractéristiques similaires au bassin de l'Archèche en climat présent.

A revoir selon comment on paramétrise dans CACTUS l'enregistrement et l'importation d'une ancienne config.

3 Lancement d'une simulation J2000

4 Visualisation des résultats

L'onglet "Résultats" permet de visualiser les résultats d'une simulation ou de comparer jusqu'à 5 simulations.

Les boîtes "Simulations à comparer", "Résultats à afficher" et "Sous-bassin versant" servent à configurer les résultats à afficher et la boîte "Résultats" située en-dessous permet de visualiser les résultats.

4.1 Sélection des simulations

La boîte "Simulations à comparer" sert à sélectionner les simulations à analyser.

Pour analyser les résultats d'une seule simulation, choisir dans le menu déroulant "Simulation 1 (référence)", la simulation à charger parmi la liste des simulations disponibles et laisser la valeur "Vide" pour les simulations 2, 3, 4 et 5. Cliquer ensuite sur le bouton "Charger les résultats". Le chargement peut prendre quelques secondes. Lorsque le chargement est terminé, des graphiques apparaissent automatiquement dans la boîte "Résultats".

Pour comparer les résultats de plusieurs simulations, sélectionner dans les menus déroulants des simulations 2 à 5 les simulations à comparer. Pour faciliter la lecture des résultats, il est conseillé de sélectionner la simulation qui servira de référence dans le menu déroulant "Simulation 1 (référence)". Il n'est pas obligatoire de charger 5 simulations, il est possible de laisser des champs vides. Une fois toutes les simulations à comparer sélectionnées, cliquer sur le bouton "Charger les résultats". Le chargement de 5 simulations peut prendre jusqu'à une vingtaine de secondes.

4.2 Sélection du type de résultat

La boîte "Résultats à afficher" permet de sélectionner les indicateurs à visualiser. Sept types de résultats sont disponibles :

- Climat : pour analyser le régime des précipitations du bassin (cumuls moyens mensuels), la fraction de précipitation solides et le régime de température.
- Régime hydrologique : pour analyser le régime hydrologique simulé (débits moyens mensuels).
- Bilan hydrologique : permet de visualiser le bilan de masse moyen annuel du bassin versant pour chaque simulation. Ce bilan permet de synthétiser les lames d'eau moyennes annuelles entrantes dans le bassin versant (appelées ici "Apports") - cumuls des précipitations liquides et solides - et les lames d'eau sortantes (appelées "Production") - cumuls d'évapotranspiration et lame d'eau écoulée dans la rivière à l'exutoire du bassin. La variation du stockage représente les variations des différents réservoirs d'eau du bassin (neige, canopée, sols, nappes, rivières). A échelle pluri-annuelle, la variation des stocks d'eau du bassin est généralement nulle. Si la variation de stocks est représentée dans la colonne "Apports" cela signifie que les stocks d'eau du bassin ont tendance à se vider d'une année à l'autre. A l'inverse, si la variation des stocks apparaît dans la colonne "Production", cela signifie que le bassin a tendance à stocker de l'eau d'une année sur l'autre.
- Contribution aux écoulements : permet de décomposer le régime hydrologique par origine de l'écoulement (ruissellement de surface, écoulement de sub-surface ou écoulement souterrain).
- Variation des stocks : permet de visualiser les variations saisonnières moyennes des trois stocks principaux du bassin : la neige, l'eau contenue dans les sols et l'eau contenue dans les nappes. Les résultats sont présentés sous la forme de moyennes journalières inter-annuelles des stocks d'eau en mm.
- Stress hydrique : permet de visualiser l'écart entre l'évapotranspiration potentielle (demande en évapotranspiration par l'atmosphère et par les plantes) et l'évapotranspiration réelle. Les résultats sont présentés sous la forme de moyennes journalières inter-annuelles des flux d'évapotranspiration en mm/jour. Un écart entre les courbes d'évapotranspiration potentielle et réelle indique que les réserves en eau des sols ne permettent pas de satisfaire la demande évaporatoire.
- Extrêmes hydrologiques (à utiliser plutôt lors de la comparaison de plusieurs simulations) : permet de comparer les indicateurs de crues à gauche (l'indicateur est le débit journalier maximal annuel, noté QJXA) et d'étiages à droite (l'indicateur est le minimum estival de la moyenne sur 10 jours du débit journalier, noté VCN10). Les résultats sont présentés sous forme de boxplots. Chaque boxplot indique la distribution statistique des valeurs annuelles des indicateurs de crues et d'étiages sur une période de 30 ans de simulation.

4.3 Sélection du sous-bassin versant

La boîte "Sous-bassin versant" permet d'afficher les résultats pour différents sous-bassin et analyser ainsi l'hétérogénéité climatique et hydrologique à l'intérieur du bassin versant.

Le bassin virtuel du modèle J2000-CACTUS possède au total 14 sous-bassins versants. Afin de limiter la quantité de données à écrire en sortie de simulation et de raccourcir les temps de simulation et de chargement des résultats, seuls les 4 sous-bassins suivants peuvent être analysés :

- le sous-bassin n°3 : sous-bassin de tête qui contient les HRUs avec les altitudes les plus élevées;
- le sous-bassin n°7 : intègre le sous-bassin n°3 ainsi que les HRUs et tronçons de rivières situées avant la confluence avec le bassin n°10;
- le sous-bassin n°10 : sous-bassin de plus basse altitude, indépendant des sous-bassins n°3 et 7;
- le sous-bassin n°14 : bassin versant entier.

5 Simulations et comparaisons de scénarios

6 Description détaillée du modèle hydrologique

Bibliographie



- Allen, R. G. et al. (1998). “Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56”. In: *Fao, Rome* 300.9. <https://www.fao.org/4/x0490e/x0490e00.htm>, p. D05109.
- Branger, F. et al. (2013). “Assessment of the influence of land use data on the water balance components of a peri-urban catchment using a distributed modelling approach”. In: *Journal of Hydrology* 505, pp. 312–325. ISSN: 0022-1694. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.09.055>.
- Branger, F et al. (2016). *Modélisation hydrologique distribuée du Rhône*. Tech. rep. <https://hal.science/hal-02605058/>. Irstea.
- Branger, F. et al. (2021). *Amélioration de la représentation des eaux souterraines dans la Modélisation hydrologique du Rhône J2000, pour une meilleure connaissance de la ressource en eau en contexte de changement global*. Tech. rep. <https://hal.inrae.fr/hal-03993797>. INRAE.
- Carsel, R. F. and R. S. Parrish (1988). “Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics”. In: *Water Resources Research* 24.5, pp. 755–769. DOI: <https://doi.org/10.1029/WR024i005p00755>.
- Krause, P. (2002). “Quantifying the impact of land use changes on the water balance of large catchments using the J2000 model”. In: *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* 27.9-10, pp. 663–673. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1474-7065\(02\)00051-7](https://doi.org/10.1016/S1474-7065(02)00051-7).
- Mimeau, L. et al. (2024). “Flow intermittence prediction using a hybrid hydrological modelling approach: influence of observed intermittence data on the training of a random forest model”. In: *Hydrology and Earth System Sciences* 28.4, pp. 851–871. DOI: [10.5194/hess-28-851-2024](https://doi.org/10.5194/hess-28-851-2024).
- Tafasca, S. (2020). “Évaluation de l’impact des propriétés du sol sur l’hydrologie simulée dans le modèle ORCHIDEE”. <http://www.theses.fr/2020SORUS117>. PhD thesis. Sorbonne université.
- Tuszynski, J. (2024). *caTools: Tools: Moving Window Statistics, GIF, Base64, ROCAUC, etc.* R package version 1.18.3. DOI: <https://doi.org/10.32614/CRAN.package.caTools>.
- Vidal, J.-P. et al. (2010). “A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system”. In: *International Journal of Climatology* 30.11, pp. 1627–1644. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.2003>.
- Watson, A. et al. (2021). “Determining Hydrological Variability Using a Multi-Catchment Model Approach for the Western Cape, South Africa”. In: *Sustainability* 13.24. ISSN: 2071-1050. DOI: <https://doi.org/10.3390/su132414058>.

A Paramètres fixes du modèle J2000-CACTUS

ID	ID aval	Ratio longueur	Rugosité	Ratio largeur	Sinuosité	Ratio alt max	Ratio alt min	Ratio aire drainée
-	-	%	m ^{1/3} /s	%	-	%	%	%
1	3	11.3	30	18	1.08	81	15	18
2	3	2.3	30	4.4	1	18	15	4.4
3	5	3.3	30	26.8	1	15	12	26.8
4	5	8,0	30	4.9	1.08	24	12	4.9
5	7	6.6	30	37.3	1	12	8	37.3
6	7	10.4	30	13.3	1.07	28	8	13.4
7	11	5.7	30	54.4	1.08	8	5.5	54.4
8	10	12.7	30	7.1	1.276	21	7.5	7.1
9	10	3.3	30	4.6	1	8.5	7.5	4.6
10	11	5.7	30	15.5	1.08	7.5	5.5	15.5
11	14	15.6	30	85.6	1.04	5.5	0	58.6
12	14	10.4	30	9.9	1.07	4.5	0	9.9
13	14	2.3	30	3.6	1	1	0	3.6
14	-	2.3	30	100	1	0	0	100

Table 6. Caractéristiques fixes du réseau de rivières. ID : identifiant du tronçon de rivière; ID aval : identifiant du tronçon de rivière situé directement en aval; Ratio longueur : longueur relative du tronçon par rapport à la longueur totale du réseau (en %); Rugosité : coefficient de Manning-Strickler (en m^{1/3}/s); Coeff largeur : largeur relative du tronçon par rapport à la largeur du tronçon 14 (en %); Sinuosité : coefficient de sinuosité du tronçon; Ratio alt max et min : altitudes relatives des points amont et aval du tronçon par rapport aux altitudes minimales et maximales du bassin (en %); Ratio aire drainée : aire drainée par le tronçon relative à l'aire totale du bassin (en %).

Guide utilisateur CACTUS

L. MIMÉAU et al.

INRAE centre Lyon-Grenoble Auvergne-Rhône-Alpes

RiverLy

April 14, 2026

p. 25



Composante du modèle J2000-CACTUS	Processus hydrologique	Paramètre	Description du paramètre	Valeur	Unité
CalcExtraterRadiation	Radiations extraterrestres	longTZ	Longitude du fuseau horaire	2.33	degré
LapseRateRegionalization	Régionalisation des températures	lapseRates	Gradient de température	0.65	K/100m
CalcRainSnowParts_IRSTEa	Phase des précipitations	snow_trs	Température seuil pour le changement de phase entre précipitation solide et précipitation liquide	2	°C
CalcRainSnowParts_IRSTEa	Phase des précipitations	snow_trans	Gamme de transition pour les précipitations mixtes (solides et liquides)	3	K
J2KKProcessInterception_conv_potET	Interception par la végétation	a_rain	Coefficient d'interception des précipitations liquides	1	mm
J2KKProcessInterception_conv_potET	Interception par la végétation	a_snow	Coefficient d'interception des précipitations solides	1.5	mm
J2KKProcessSnow_IRSTEa	Processus liés à la neige	actSIAsCf	Facteur correctif pour la pente et l'orientation	0	-
J2KKProcessSnow_IRSTEa	Processus liés à la neige	baseTemp	Température seuil pour la fonte	0	°C
J2KKProcessSnow_IRSTEa	Processus liés à la neige	t_factor	Facteur de fonte lié à la température	1.84	mm/°C
J2KKProcessSnow_IRSTEa	Processus liés à la neige	r_factor	Facteur de fonte lié à la pluie	0.0125	°C ⁻¹
J2KKProcessSnow_IRSTEa	Processus liés à la neige	g_factor	Facteur de fonte lié au sol	0	mm
J2KKProcessSnow_IRSTEa	Processus liés à la neige	snowCritDens	Densité de neige critique	0.7	g/cm ³
J2KKProcessSnow_IRSTEa	Processus liés à la neige	ccf_factor	facteur de contenu en froid	0.0012	-
J2KKProcessLumpedSoilWater_Tom_Ivan_sa	Processus liés aux sols	soilDiffMPSLPS	Coefficient de diffusion entre les réservoirs MPS et LPS	5	-
J2KKProcessLumpedSoilWater_Tom_Ivan_sa	Processus liés aux sols	soilOutLPS	Coefficient d'écoulement du réservoir LPS	5	-
J2KKProcessLumpedSoilWater_Tom_Ivan_sa	Processus liés aux sols	soilLatVertLPS	Coefficient de distribution latéral-vertical du réservoir LPS	1	-
J2KKProcessLumpedSoilWater_Tom_Ivan_sa	Processus liés aux sols	soilMaxPerc	Taux maximum de percolation	20	mm/day
J2KKProcessLumpedSoilWater_Tom_Ivan_sa	Processus liés aux sols	soilConcRD1	Coefficient de concentration du réservoir RD1	1	-
J2KKProcessLumpedSoilWater_Tom_Ivan_sa	Processus liés aux sols	soilConcRD2	Coefficient de concentration du réservoir RD2	1	-
J2KKProcessGroundwater_satRG1_sa	Processus liés aux nappes	gwRG1RG2dist	Coefficient de distribution entre les réservoirs RG1 et RG2	0	-
J2KKProcessGroundwater_satRG1_sa	Processus liés aux nappes	gwCapRise	Facteur de remontée par capillarité	0.3	-
J2KKProcessReachRouting_sa	Routage dans le réseau de rivières	flowRouteTA	Coefficient pour le routage en rivière	3	-

Table 7. Paramètres globaux fixes du modèle J2000-CACTUS

INRAE

la science pour la vie, l'humain, la terre





INRAE

147 rue de l'Université
75338 Paris cedex 07
Tél.: +33 (0)1 42 75 90 00

inrae.fr

**Institut national de recherche pour
l'agriculture, l'alimentation et l'environnement**



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

INRAE