

STE



POLYTECH Montpellier

Département **STE**

Projet de fin d'étude

**Interprétation et développement du modèle SCS
pour la modélisation de séries chronologiques continues**

Antoine SOGNOS

UMR **HSM**

Année universitaire **2025–2026**

Encadrants :

Vincent GUINOT
Luc NEPPEL
Violetta MONTOYA CORONADO

Table des matières

Liste des abréviations et notations

1	Introduction	1
1.1	Contexte : du SCS événementiel à des formulations continues	1
1.2	Organisation du rapport	2
1.2.1	Code, architecture du projet et reproductibilité	2
2	Matériel et Méthodes	2
2.1	Sites d'étude et données disponibles	2
2.1.1	Bassin versant du Cloutasse	2
2.1.2	Chaussée drainante à structure réservoir (CSR)	3
2.2	Description des modèles hydrologiques	3
2.2.1	Modèle A : SCS continu de référence	3
2.2.2	Modèle B : ajout d'un réservoir de routage de surface	4
2.2.3	Modèle C : ajout d'une recirculation alimentée par l'infiltration	4
2.2.4	Modèle D (CSR) : routage en cascade	5
2.3	Découpage des événements pluie–ruissellement	5
2.3.1	Procédure générale	6
2.3.2	Signatures volumétriques : calcul de la pluie tombée et de la lame ruissellée	6
2.3.3	Méthode d'identification des constantes de vidange	6
2.4	Calibration : multistart, méthode de Powell et fonction objectif	7
2.5	Exploration finale : calibration continue et évaluation globale (CSR)	8
2.5.1	Cadre commun : utilisation du SCS continu comme "noyau " (modèle A)	8
2.5.2	Période simulée et année hydrologique	8
2.5.3	Warm-up : neutraliser l'arbitraire des conditions initiales	9
2.5.4	Validation croisée temporelle (splits 6 mois)	9
2.5.5	Spécificité CSR : exploiter Q_{inf} pour contraindre les flux internes	9
2.5.6	Stratégie de calibration en 2 étapes	9
2.5.7	Bornes, paramètres fixés et cohérence avec les signatures indépendantes	9
2.5.8	Simulation continue : calage puis validation avec conditions initiales cohérentes	10
2.5.9	En quoi cette approche diffère de la méthodologie précédente	10
3	Résultats	10
3.1	Signatures observées : bassin du Cloutasse	10
3.1.1	Relation événementielle pluie–ruissellement $h_r = f(h_p)$	10
3.1.2	Constantes de vidange issues des décrues	11
3.2	Signatures observées : bassin du CSR	11
3.2.1	Relation événementielle pluie–ruissellement $h_r = f(h_p)$	11
3.2.2	Constantes de vidange issues des décrues	12
3.3	Performances des schémas	12
3.3.1	Cloutasse : effet des extensions (A → B → C)	12
3.3.2	CSR : effet des extensions (A → B → D)	13
3.4	Calibration annuelle	13
3.4.1	Modèle SCS continu sans routage	13
3.4.2	Modèle modifié à deux réservoirs (schéma D)	15
4	Conclusion et perspectives	16
A	Annexes	18
A.1	Vue d'ensemble des schémas A à D	18
A.2	Résultat Cloutasse	18
A.3	Résultat CSR	19
A.4	Calibration finale	19

Table des figures

2.1	Schéma conceptuel du modèle SCS continu (schéma A)	4
2.2	Schéma conceptuel du modèle SCS continu avec routage de surface (schéma B)	4
2.3	Schéma conceptuel du modèle SCS continu avec compartiment lent (schéma C)	5
2.4	Schéma conceptuel du CSR avec deux réservoirs de routage en série	5
3.1	Cloutasse : cumul de pluie en fonction du cumul ruissellé	10
3.2	Exemple d'évènement découpé	10
3.3	Cloutasse : schéma A	12
3.4	Cloutasse : schéma B	12
3.5	Cloutasse : schéma C	12
3.6	repartition mensuelle des NSE et KGE avec modélisation annuelle (modèle A étendu)	14
3.7	Ratio des volumes modélisé et observé entre la période H1 (calibration et H2 (validation)	14
3.8	Exemple d'un évènement issu de la procédure de calibrage	14
3.9	Volume observé en fonction du volume modélisé pour chaque évènement	14
3.10	évènement issu de la procédure de calibrage validée	15
3.11	évènement issu de la procédure de calibrage validée	15
3.12	Volume observé en fonction du volume modélisé pour chaque évènement	15
3.13	Métriques (KGE et NSE) mensuelles	15
A.1	CSR : relation évènementielle $h_r = f(h_p)$	19
A.2	Exemple d'évènement découpé	19
A.3	modèle C sur CSR	19
A.4	CSR : schéma A	19
A.5	CSR : schéma B	19

Liste des tableaux

A.1	Tableau A.1 – Progression contrôlée des schémas SCS continus (A à D) : noyau commun, sorties visées, et paramètres/états ajoutés d'un modèle au suivant. Les schémas partagent un module de <i>production</i> SCS continue (abstraction h_a , sol h_s) et se distinguent par l'opérateur de <i>transfert</i> (routage / voie lente / cascade).	18
A.2	Cloutasse – Constantes de vidange issues des décrues (synthèse à deux échelles)	18
A.3	CSR – Constantes de vidange estimées sur décrues	19

Liste des abréviations et notations

Abréviations

SCS	<i>Soil Conservation Service (USDA)</i>
CN	<i>Curve Number (indice SCS)</i>
SCS–CN	Méthode SCS–Curve Number (formulation événementielle classique)
ETP	Évapotranspiration potentielle
BV	Bassin versant
CSR	Chaussée drainante à structure réservoir
OTHU	Observatoire de Terrain en Hydrologie Urbaine
RMSE	<i>Root Mean Square Error</i> (erreur quadratique moyenne)
NSE	<i>Nash–Sutcliffe Efficiency</i>
KGE	<i>Kling–Gupta Efficiency</i>
CV	Validation croisée (<i>cross-validation</i>)
H1/H2	Demi-périodes de calage/validation (splits temporels)

Notations

Symbol	Définition	Unité
P	Pluie cumulée sur un évènement	mm
Q	Débit	m^3/s
Q_{ruiss}	Débit ruissellé observé (CSR)	L/h
Q_{inf}	Débit drainé interne observé (CSR)	L/h
A_{BV}	Surface contributive / surface de bassin	m^2 ou km^2
Δt	Pas de temps	s
t	Temps	s, min, h
h_p	Hauteur de pluie évènementielle ($\int P$)	mm
h_r	Hauteur équivalente d'écoulement sur l'évènement	mm
I_a	Abstraction initiale (capacité du réservoir h_a)	mm
S	Capacité maximale de rétention (stockage sol)	mm
h_a	Stock du réservoir d'abstraction initiale	mm
h_s	Stock du réservoir de sol	mm
h_r	Stock du réservoir de surface (routage)	mm
h_{sub}	Stock du compartiment lent (schéma C)	mm
q	Pluie nette (flux après abstraction)	mm/s
v	Infiltration (flux)	mm/s
r_{gen}	Ruisseaulement généré (excédent non infiltré)	mm/s
r_{out}	Flux sortant du réservoir de surface	mm/s
k	Constante de vidange (générique)	s^{-1}
k_{runoff}	Constante de routage rapide (surface)	s^{-1}
k_{seepage}	Constante de vidange lente / drainage interne	s^{-1}
k_{sub}	Constante du compartiment lent (schéma C)	s^{-1}
α_{sub}	Fraction de l'infiltration alimentant la voie lente	-
$t_{1/2}$	Demi-vie ($t_{1/2} = \ln(2)/k$)	s, min, h

Résumé.

La modélisation pluie–ruissellement constitue un outil central pour l'analyse hydrologique, mais de nombreuses approches opérationnelles reposent encore sur des formulations événementielles, peu adaptées à l'exploitation de chroniques continues à pas de temps fin. Parmi elles, la méthode du *Soil Conservation Service* (SCS) est largement utilisée pour sa simplicité, au prix d'une représentation très simplifiée des dynamiques de stockage et de transfert.

Ce travail propose et évalue un cadre méthodologique fondé sur des extensions continues du modèle SCS, formulées à partir d'une représentation conceptuelle par réservoirs et inscrites dans un bilan de masse explicite. L'objectif est d'analyser dans quelle mesure ces formulations permettent de reproduire des dynamiques de ruissellement réalistes sur des systèmes hydrologiques contrastés, tout en conservant un nombre limité de paramètres interprétables.

L'approche est appliquée à deux sites aux fonctionnements très différents : un bassin versant naturel méditerranéen (Cloutasse), caractérisé par une mémoire hydrologique marquée et une observation limitée à un débit à l'exutoire, et un ouvrage urbain expérimental fortement instrumenté (chaussée drainante à structure réservoir, CSR), pour lequel les flux rapides et internes sont mesurés séparément. Cette double application permet d'évaluer la robustesse et les limites du formalisme continu dans des contextes naturels et urbains.

Les résultats montrent que les formulations continues du SCS permettent de fermer correctement les bilans hydrologiques et de reproduire les grandes tendances des écoulements observés, mais que l'absence de temps de transfert explicite conduit, à pas de temps fin, à des réponses excessivement instantanées et à des performances temporelles dégradées. L'introduction de structures de routage simples, en particulier sous forme de cascade de réservoirs, améliore significativement la restitution des hydrogrammes sur le site urbain. La validation croisée temporelle met toutefois en évidence une sensibilité marquée des paramètres contrôlant les volumes aux conditions saisonnières, soulignant les limites d'un calage global stationnaire.

Ce travail met ainsi en évidence l'intérêt et les limites des extensions continues du SCS, et montre que leur utilisation en régime continu requiert une dissociation explicite entre production de ruissellement et mécanismes de transfert, ainsi qu'une attention particulière à la variabilité intra-annuelle des paramètres.

Mots-clés : modélisation hydrologique continue ; SCS–Curve Number ; pluie–ruissellement ; modèles conceptuels à réservoirs ; routage hydrologique ; validation croisée temporelle.

Abstract.

Rainfall–runoff modelling is a cornerstone of hydrological analysis, yet many operational approaches still rely on event-based formulations that are poorly suited to continuous time series at fine temporal resolution. Among them, the *Soil Conservation Service* (SCS) method is widely used for its simplicity, at the cost of a highly simplified representation of storage and transfer processes.

This study proposes and evaluates a methodological framework based on continuous extensions of the SCS model, formulated through a conceptual reservoir representation embedded in an explicit mass balance. The objective is to assess to what extent these formulations can reproduce realistic runoff dynamics across contrasted hydrological systems, while maintaining a limited number of interpretable parameters.

The approach is applied to two markedly different study sites: a natural Mediterranean catchment (Cloutasse), characterized by significant hydrological memory and a single discharge observation at the outlet, and a highly instrumented urban experimental facility consisting of a permeable pavement structure (CSR), where fast runoff and internal drainage fluxes are measured separately. This dual application provides a robust basis to evaluate the transferability and structural limits of continuous SCS formulations in both natural and urban contexts.

Results show that continuous SCS formulations allow for consistent mass balance closure and capture the overall runoff dynamics, but that the absence of explicit transfer times leads, at fine temporal resolution, to excessively instantaneous responses and degraded temporal performance. Introducing simple routing structures, particularly in the form of a reservoir cascade, substantially improves the reproduction of observed hydrographs at the urban site. However, temporal cross-validation reveals a pronounced sensitivity of volume-controlling parameters to seasonal conditions, highlighting the limitations of assuming stationary parameter sets in continuous modelling.

Overall, this work demonstrates that continuous extensions of the SCS model can provide a meaningful representation of runoff dynamics, provided that runoff production and transfer processes are explicitly dissociated and that intra-annual variability is carefully considered.

Keywords: continuous hydrological modelling ; SCS–Curve Number ; rainfall–runoff ; conceptual reservoir models ; hydrological routing ; temporal cross-validation.

Chapter 1

Introduction

1.1 Contexte : du SCS événementiel à des formulations continues

La méthode du *Soil Conservation Service* (SCS), ou méthode du *Curve Number* (CN), constitue aujourd’hui l’un des modèles pluie–ruissellement les plus utilisés au monde, en particulier dans les bureaux d’études et les services opérationnels [Ponce and Hawkins, 1996]. Introduite par Mockus [1956] au sein de l’USDA–SCS, elle propose une relation empirique simple entre la pluie cumulée et le ruissellement direct produit sur un bassin versant, pour un évènement donné. Le modèle repose sur deux grandeurs clés : l’abstraction initiale I_a , qui représente les pertes préalables (stockage dans les dépressions, interception, humidification de surface), et la capacité maximale de rétention du sol S , qui traduit le stockage potentiellement mobilisable dans la zone non saturée. En considérant un bilan volumique élémentaire sur l’évènement, la relation classique reliant pluie cumulée P et ruissellement direct Q s’écrit :

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S}, \quad (1.1)$$

avec $Q = 0$ tant que $P \leq I_a$. Le paramètre adimensionnel CN , compris entre 0 et 100, est relié à S par une relation empirique et condense l’information sur l’occupation du sol, la perméabilité et l’état hydrologique du bassin. Cette représentation simple explique la large diffusion du SCS–CN dans les logiciels d’hydrologie opérationnelle et dans la pratique des études d’impact.

Limits de la formulation événementielle classique

Historiquement, la méthode SCS a été conçue pour des bassins versants agricoles de petite taille, analysés à l’échelle de quelques évènements pluvieux isolés. Assez rapidement, plusieurs limites structurelles ont été mises en évidence. Une première critique concerne l’absence de représentation explicite de la cinétique d’infiltration. La relation entre P et Q est purement statique, ce qui conduit à une réponse hydrologique instantanée, sans prise en compte des temps de transfert dans le sol ou en surface [Hawkins, 1975, Ponce and Hawkins, 1989]. Cette vision instantanée s’accorde mal avec les hydrogrammes observés, qui présentent des montées en charge progressives et des décrues parfois très étalées.

Une seconde limite tient à la sensibilité de la méthode au choix du paramètre CN . Dans des contextes hétérogènes, karstiques ou fortement anthropisés, l’identification d’un CN unique devient discutable, et le modèle peut conduire à des ruissellements soit largement sous-estimés, soit au contraire très exagérés. Enfin, l’hypothèse historique $I_a = 0,2S$ a été critiquée par de nombreux travaux, qui montrent que le coefficient $\lambda = I_a/S$ présente une variabilité spatiale et saisonnière marquée [Krajewski et al., 2022]. Malgré ces critères, la méthode SCS a été régulièrement révisée (1956, 1964, 1972, 1993, 2004 [USDA-NRCS, 2004]), et de nombreuses extensions ont été proposées : prise en compte de la durée de pluie, corrections liées à la pente, couplage avec des lois d’infiltration de type Green–Ampt [Soulis and Valiantzas, 2011], ou encore ajustements empiriques en fonction de l’humidité initiale [Mishra and Singh, 1999].

Ces développements successifs ont permis d’adapter le SCS à un large éventail de contextes, mais sans lever complètement le caractère statique et événementiel de la formulation d’origine.

Vers des formulations continues du SCS

Dans une perspective plus conceptuelle, Beven [2021] insiste sur le fait qu’une modélisation cohérente du ruissellement nécessite une représentation dynamique et physiquement fondée de l’infiltration. La formulation événementielle du SCS souffre d’une “instantanéité” qui tranche avec la dynamique réelle des bassins versants, où les processus de recharge, de saturation, de ruissellement de surface et d’écoulement souterrain interagissent à des échelles de temps variées.

Les travaux récents prolongent cette réflexion en proposant une mise en équation différentielle de la relation $P–Q$ puis une version *continue* où l’infiltration, la vidange du sol et l’abstraction initiale sont explicitement décrites par des équations d’évolution discrétisées dans le temps. Dans cette approche, le stockage dans le sol est représenté par un réservoir de capacité S , alimenté par l’infiltration et vidé par un terme de *seepage* profond, tandis que

l'abstraction initiale I_a est modélisée sous la forme d'un réservoir superficiel soumis à l'ETP. Le tout s'inscrit dans un bilan de masse, qui permet de suivre explicitement les stocks et les flux internes.

L'intérêt principal de cette formulation continue est double. D'une part, elle permet de travailler à pas de temps fin sur des chroniques longues, en enchaînant plusieurs épisodes successifs avec des conditions initiales cohérentes. D'autre part, elle ouvre la voie à des stratégies de calibration en traitant directement des paramètres interprétables ($I_a, S, k_{\text{infiltr}}, k_{\text{seepage}}$), tout en contrôlant la fermeture du bilan. Le présent travail s'inscrit dans cette perspective : tester une version continue du SCS sur un bassin versant naturel (Cloutasse) et sur un ouvrage urbain instrumenté (CSR), afin d'évaluer à la fois la capacité de reproduction des hydrogrammes et la robustesse des paramètres lorsqu'on change de type de système.

1.2 Organisation du rapport

Le rapport est structuré de manière à séparer clairement (i) la construction méthodologique, (ii) les signatures observées extraites des données, et (iii) l'évaluation progressive des variantes de modèle. Le Chapitre 2 présente les sites d'étude, les jeux de données et le formalisme des schémas SCS continus (A à D), ainsi que les procédures communes de découpage d'événements, de calcul des signatures volumétriques (h_p, h_r) et d'identification de constantes de vidange à partir des décrues. La stratégie de calibration (multi-start, méthode de Powell) et les fonctions objectif retenues selon le site y sont également détaillées, avec un focus sur l'exploitation de Q_{inf} au CSR pour contraindre le fonctionnement interne.

Le Chapitre 3 s'ouvre ensuite sur les signatures observées sur chacun des sites (relation $h_r = f(h_p)$, distributions de constantes de décrue) afin de disposer d'un diagnostic indépendant de toute optimisation. Les performances des schémas sont ensuite comparées de façon progressive (A → B → C sur le Cloutasse, A → B → D sur le CSR) afin d'identifier les verrous structurels (réponse trop instantanée, queues de décrue, séparations d'échelles de temps). Enfin, une simulation continue sur année hydrologique au CSR permet d'évaluer la stabilité des paramètres et le pouvoir prédictif via validation croisée temporelle, en conditions initiales cohérentes (warm-up et continuité calage/validation). Le rapport se conclut par une synthèse des apports, des limites et des perspectives prioritaires, notamment sur l'identifiabilité des paramètres et la représentation du drainage interne au CSR.

1.2.1 Code, architecture du projet et reproductibilité

L'ensemble des développements numériques réalisés dans ce travail (prétraitement des données, extraction des signatures hydrologiques, calibration et simulation des modèles SCS continus) repose sur des scripts Python développés spécifiquement dans le cadre de ce projet. Dans un souci de transparence et de reproductibilité, l'intégralité du code source, accompagnée de sa documentation et de l'organisation des fichiers, est mise à disposition dans un dépôt *GitHub* public : <https://github.com/antisognos/PFE-SCS-continu/tree/v1.0-pfe>. Les détails relatifs à l'architecture du projet, aux dépendances de python et aux procédures de reproduction des résultats sont décrits dans le `README` du dépôt et rappelés dans le chapitre Méthodes.

Chapter 2

Matériel et Méthodes

2.1 Sites d'étude et données disponibles

Cette étude repose sur deux systèmes hydrologiques volontairement contrastés : (i) un bassin versant naturel de montagne (Cloutasse), et (ii) un ouvrage urbain expérimental instrumenté (chaussée drainante à structure réservoir, CSR). L'objectif n'est pas de comparer directement des performances en valeur absolue, mais d'évaluer la cohérence d'un même formalisme conceptuel (SCS continu) lorsqu'il est confronté à des dynamiques, des échelles spatiales et des niveaux de contrôle très différents.

2.1.1 Bassin versant du Cloutasse

Le bassin versant du Cloutasse est un petit bassin granitique de surface $A_{\text{BV}} \simeq 0,81 \text{ km}^2$, situé sur le versant sud du Mont-Lozère, dans la partie amont du bassin du Tarn. L'altitude s'étage approximativement entre 1290 m et 1490 m, pour une pente moyenne de l'ordre de 18 %. Le substratum granitique est recouvert de sols et formations superficielles d'épaisseur moyenne voisine de 70 cm, conférant au bassin une capacité d'infiltration non négligeable

et une réponse hydrologique marquée par la présence de stockages internes.

Le climat est de type méditerranéen montagnard, avec une pluviométrie annuelle moyenne proche de 2000 mm/an, incluant une part significative de précipitations neigeuses. Le bassin est soumis à des épisodes pluvieux intenses en automne (crues cévenoles), ce qui induit une forte variabilité intra-annuelle des états hydriques et des réponses hydrologiques pouvant combiner des montées rapides et des décrues prolongées.

Données disponibles

L'analyse du Cloutasse repose sur deux chroniques complémentaires : (i) une série pluie-débit à pas de temps fin, utilisée pour la dynamique événementielle et la calibration, et (ii) une série d'évapotranspiration potentielle (ETP) à pas journalier, utilisée pour représenter la déplétion des réservoirs entre épisodes.

Chronique pluie-débit. Le fichier `PQ_BV_Cloutasse.csv` fournit une série à pas nominal de 5 minutes sur la période **2020–2024**. Il contient une pluie discrétisée (P_{mm} , en mm par pas de temps) et un débit observé à l'exutoire (Q_{1s} , en L/s). Deux horodatages distincts sont conservés pour la pluie et le débit, ce qui reflète le fonctionnement propre des capteurs. Dans la pratique, le débit est enregistré sur un pas strictement régulier, tandis que la pluie présente de légères irrégularités temporelles, corrigées lors de la mise sur une grille commune.

Évapotranspiration potentielle. Le fichier `ETP_SAFRAN_J.csv` fournit une ETP journalière (mm/j) sur une période couvrant largement celle de l'étude, sans valeurs manquantes sur l'intervalle exploité. Cette variable intervient comme un forçage externe lent, contrôlant la vidange progressive des réservoirs entre événements pluvieux.

2.1.2 Chaussée drainante à structure réservoir (CSR)

Le second site d'étude est un ouvrage urbain expérimental instrumenté de l'OTRU, implanté sur le campus LyonTech La Doua à Villeurbanne (69) : une *chaussée drainante à structure réservoir* (CSR) réalisée sur une zone de stationnement. Contrairement à un bassin versant naturel, l'"aire contributive" est ici **définie et contrôlée** : elle correspond strictement à l'emprise hydraulique de l'ouvrage, de surface $A \simeq 94 \text{ m}^2$. Cette configuration est particulièrement intéressante pour un modèle continu en bilan de masse, car l'entrée (pluie) et les sorties principales sont mesurées séparément, ce qui rend les signatures événementielles et les échelles de temps plus directement observables.

Jeu de données et variables disponibles

Toutes les analyses CSR s'appuient sur un fichier unique : `Donnees_serie_complexe_2022-2024_corrigee_AS.csv` (séparateur ;), qui contient une chronique à pas de temps de 2 minutes, contenant les dates, la pluie incidente (mm par pas), le débit ruissellé (L/h) et débit drainé interne mesuré en sortie de structure (L/h). La chronique couvre la période du **01/01/2022 00:00** au **01/01/2025 00:00**. Le pas de temps constant vaut $\Delta t = 120 \text{ s}$.

2.2 Description des modèles hydrologiques

Les différents schémas SCS continus considérés dans ce travail (A à D) s'inscrivent dans un cadre commun de production SCS, mais se distinguent par la manière dont l'excédent est transféré vers les sorties observées. Afin d'éviter des répétitions inutiles, les caractéristiques structurelles essentielles de chaque schéma (réservoirs, sorties ciblées et paramètres associés) sont synthétisées dans le tableau récapitulatif présenté en annexe (Tab. ??). La présente section se concentre donc sur la logique conceptuelle et la motivation hydrologique de chaque extension.

2.2.1 Modèle A : SCS continu de référence

Le modèle A constitue la structure de référence. Il repose sur une formulation continue du modèle SCS, dans laquelle la pluie nette est produite à partir de la pluie brute selon le principe classique du SCS, puis transformée en ruissellement sans représentation explicite de processus de vidange différenciés.

Dans cette configuration, le ruissellement est directement relié à la pluie nette produite par le modèle, et aucun réservoir dédié à des écoulements lents ou souterrains n'est introduit. Le modèle ne distingue donc pas explicitement les contributions rapides et lentes à l'exutoire.

Le schéma A est la première version du SCS continu utilisée dans ce travail. Il conserve (i) une abstraction initiale représentée par un réservoir h_a de capacité I_a , (ii) un stockage de sol h_s de capacité S , et (iii) un stockage de surface h_r qui accumule l'excédent non infiltré. La spécificité du schéma A est l'absence de routage : le débit modélisé est directement proportionnel au ruissellement généré au pas de temps (ce qui tend à produire une réponse trop abrupte, diagnostic qui motive l'introduction d'un réservoir de routage au schéma B).

À chaque pas de temps Δt , la pluie incidente alimente d'abord un réservoir d'abstraction initiale $h_a \in [0, I_a]$. Tant que $h_a < I_a$, il n'y a pas de pluie nette ; dès que h_a atteint I_a , l'excédent déborde et définit une pluie nette q . Le sol est représenté par un stock $h_s \in [0, S]$. L'infiltration potentielle v_{pot} est calculée via la loi HSM en fonction de la saturation h_s/S , puis bornée par l'eau effectivement disponible en surface. Enfin, le stock de sol se vide vers une voie profonde par une loi linéaire en stock, caractérisée par k_{seepage} (constante effective de drainage). Les différences entre modèles A à D portent ensuite sur la manière de transformer r_{gen} (production) en débit observé (transfert), et sur l'éventuelle existence d'une voie lente explicitement routée vers l'exutoire.

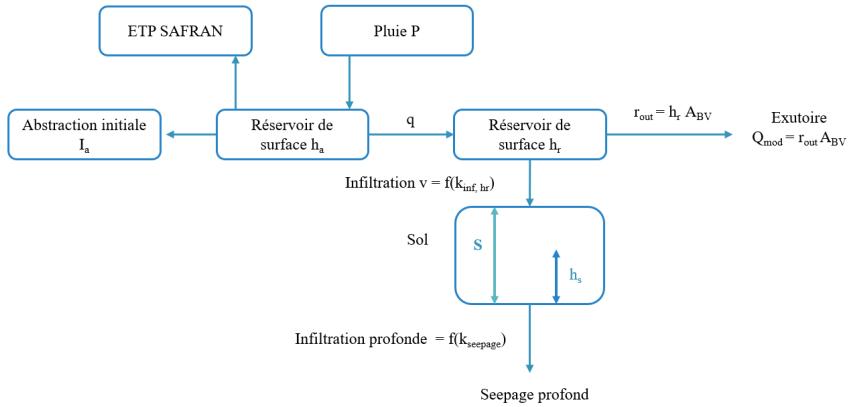


Figure 2.1 – Schéma conceptuel du modèle SCS continu (schéma A).

2.2.2 Modèle B : ajout d'un réservoir de routage de surface

Le ruissellement généré r_{gen} est alimenté par un stock de surface h_r , qui se vide progressivement vers l'exutoire selon une loi de réservoir linéaire. Le débit modélisé n'est donc plus directement lié à la génération, mais au contenu du stock de surface.

Le routage par réservoir linéaire de surface est défini comme suit. Le stock de surface h_r reçoit r_{gen} et se vide vers l'exutoire selon une loi linéaire :

$$r_{out}^n = k_{runoff} h_r^n, \quad (2.1)$$

où k_{runoff} (s^{-1}) est une constante de vidange. Afin de garantir la cohérence du bilan de masse, le flux sortant est borné de manière à ne pas excéder l'eau effectivement disponible au cours du pas de temps :

$$r_{out}^n \leq \frac{h_r^n}{\Delta t} + r_{gen}^n - r_{inf, h_r}^n. \quad (2.2)$$

Cette contrainte empêche toute vidange non physique du réservoir. Le paramètre k_{runoff} représente un temps caractéristique de transfert vers l'exutoire :

$$t_{1/2} = \frac{\ln(2)}{k_{runoff}}. \quad (2.3)$$

Une valeur élevée correspond à une réponse très rapide, tandis qu'une valeur plus faible étaie l'hydrogramme sans modifier les volumes produits. Ce paramètre n'a pas vocation à représenter explicitement un réseau hydraulique ou une vitesse d'écoulement, mais constitue un correctif structurel permettant de lisser la réponse du schéma A.

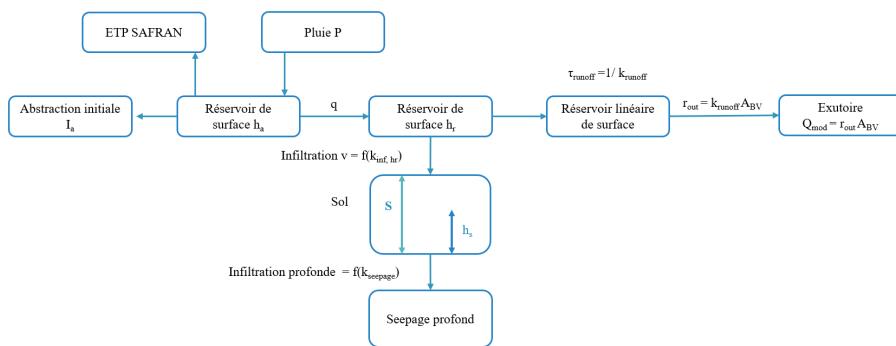


Figure 2.2 – Schéma conceptuel du modèle SCS continu avec routage de surface (schéma B).

2.2.3 Modèle C : ajout d'une recirculation alimentée par l'infiltration

Le modèle C introduit une séparation explicite entre les composantes rapides et lentes du ruissellement. Deux réservoirs distincts sont considérés : un réservoir de ruissellement rapide, associé aux écoulements de surface, et un réservoir lent, associé à des transferts retardés vers l'exutoire.

Chaque réservoir est caractérisé par sa propre constante de vidange, permettant de représenter des temps de réponse différenciés. Cette structuration offre une plus grande flexibilité dans la reproduction des hydrogrammes, en particulier pour les événements présentant des décroissances multi-pentes.

Ce modèle permet d'évaluer dans quelle mesure une séparation explicite entre écoulements rapides et lents améliore la description des dynamiques observées, au prix d'une complexification modérée de la structure du modèle.

Le schéma C introduit un paramètre de partage $\alpha_{sub} \in [0, 1]$. Sur chaque pas de temps, une fraction α_{sub} du volume infiltré alimente le réservoir lent, et le complément alimente le réservoir de sol. Ainsi, h_{sub} représente un

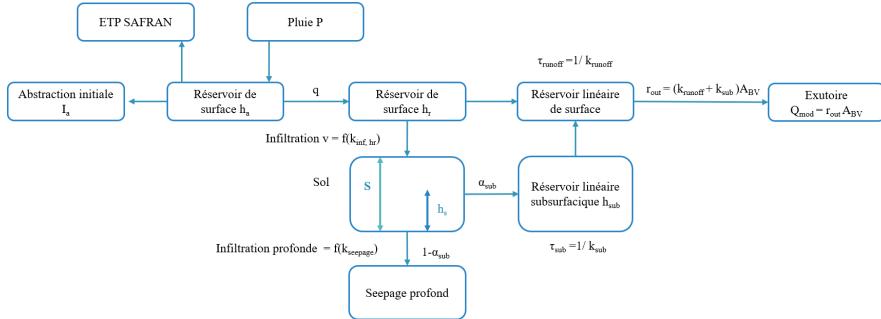


Figure 2.3 – Schéma conceptuel du modèle SCS continu avec compartiment lent (schéma C).

drainage retardé alimenté par l'infiltration. Le réservoir souterrain se vide vers l'exutoire par une loi linéaire :

$$q_{sub}^n = k_{sub} h_{sub}^{n,*}, \quad (2.4)$$

où $h_{sub}^{n,*}$ est le stock après alimentation par la recirculation.

Alors le débit total devient la somme de la composante rapide (surface) et de la composante lente (subsurface), convertie en débit volumique via la surface du bassin A_{BV} :

$$Q_{mod}^n = (r_{out}^n + q_{sub}^n) A_{BV}. \quad (2.5)$$

Ce schéma introduit deux paramètres supplémentaires par rapport au schéma B : (1) k_{sub} (s^{-1}), qui contrôle la vitesse de drainage du compartiment lent, et (2) α_{sub} (-), qui pilote la fraction de l'infiltration alimentant la voie lente. Comme pour le routage de surface, une interprétation pratique consiste à exprimer les constantes sous forme de demi-vies :

$$t_{1/2} = \frac{\ln(2)}{k}. \quad (2.6)$$

2.2.4 Modèle D (CSR) : routage en cascade

Le modèle D est spécifique au site CSR, où l'on observe séparément un flux rapide Q_{ruiss} et un flux drainé interne Q_{inf} . Deux choix structurants sont introduits.

Premièrement, le routage rapide est représenté par une cascade de deux réservoirs en série, afin de reproduire simultanément une réponse très rapide (montée/pic) et une queue de décrue plus étalée. En notant h_{r1} et h_{r2} les stocks, on écrit :

$$r_{1,out}^n = k_{runoff1} h_{r1}^n, \quad r_{2,out}^n = k_{runoff2} h_{r2}^n, \quad (2.7)$$

avec transfert $h_{r1} \rightarrow h_{r2}$, et le débit ruisselé modélisé :

$$Q_{ruiss,mod}^n = r_{2,out}^n A. \quad (2.8)$$

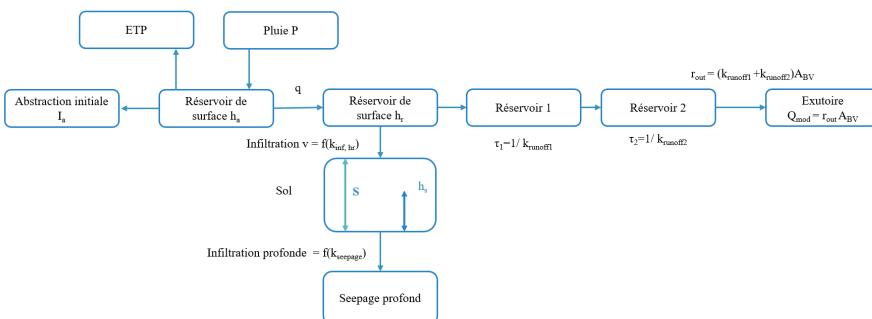


Figure 2.4 – Schéma conceptuel du CSR avec deux réservoirs de routage en série

Ainsi, les schémas A à D ne constituent pas des modèles indépendants, mais une progression contrôlée de complexité à partir d'un même noyau SCS continu. Le tableau ?? (Annexe) propose une lecture transversale de cette progression, en mettant en regard les structures, les sorties visées et les paramètres supplémentaires introduits. Cette organisation permet d'interpréter les résultats en termes de verrous structurels, plutôt qu'en simple comparaison de performances numériques.

2.3 Découpage des événements pluie–ruissellement

L'analyse événementielle sert ici de filtre hydrologique, c'est à dire que plutôt que d'exploiter toute la chronique continue, on extrait dans un premier temps des fenêtres temporelles comparables et suffisamment propres pour

(i) intégrer des bilans de volumes (pluie et écoulements) et (ii) isoler des phases de décrue interprétables pour estimer des constantes de vidange. L'objectif n'est donc pas l'exhaustivité, mais la robustesse : conserver moins d'événements, mais bien délimités et exploitables.

Ainsi pour cela on doit définir comment découpe et isoler un évènement. Nous définissons un évènement comme une fenêtre continue $[t_0, t_1]$ contenant (i) une pluie incidente significative et (ii) une réponse hydrologique mesurable, encadrées par des périodes de faible activité qui permettent d'approcher un état de référence du système. Les instants t_0 et t_1 ne sont pas supposés naturels, ils résultent d'un choix méthodologique destiné à limiter (a) l'influence de l'évènement précédent (début) et (b) l'intégration d'une vidange trop longue, difficilement attribuable à l'épisode.

2.3.1 Procédure générale

Le découpage suit une logique identique sur les deux sites. On commence par 1) Détecter un noyau d'activité. En repérant un noyau temporel où le système est actif, déclenché dès qu'un critère minimal est satisfait (pluie et/ou débit). Le noyau est prolongé tant que l'activité persiste, et des blocs proches peuvent être fusionnés si l'accalmie entre eux est trop courte pour correspondre à une séparation hydrologique réelle. Ensuite en 2) on détermine les bornes t_0 et t_1 . À partir du noyau, la fenêtre est étendue vers l'amont puis vers l'aval pour constituer un épisode complet. Cette étape conditionne directement les volumes h_p et h_r (et la portion de décrue disponible) ; elle impose donc un retour vers un état de référence défini à partir des variables observées (absence de pluie et faibles débits sur une durée minimale). Enfin en 3) on effectue un filtrage sur la qualité. On écarte les épisodes peu informatifs (pluie trop faible, réponse trop faible), ambigus (évenement incomplet, superposition non séparable) ou aberrants (durée incohérente). L'enjeu est d'éviter d'introduire des événements dominés par le bruit ou par des artefacts de découpe, qui dégraderaient les signatures utilisées ensuite.

Spécificité Cloutasse : bassin naturel avec débit de base et mémoire hydrologique

Au Cloutasse, la variable de sortie est un débit unique à l'exutoire, sur un système naturel où un débit de base non nul persiste souvent entre deux épisodes. Alors l'état au repos n'est pas un retour clair à zéro, et les transitions peuvent être progressives (mémoire des stocks, connectivité variable, bruit relatif important en bas débits, valeurs manquantes/interpolations). En conséquence, le découpage doit rester tolérant : le noyau peut être déclenché par une pluie faible mais non nulle, puis l'évènement n'est retenu que si la réponse en débit s'écarte durablement d'un niveau de référence estimé localement. La fin t_1 est atteinte lorsque la pluie est nulle (ou négligeable) sur une durée suffisante et que le débit revient durablement au voisinage de ce niveau de référence. Cette stratégie accepte une certaine superposition en périodes humides, mais évite une sélection trop agressive qui supprimerait la majorité des épisodes exploitables.

Spécificité CSR : ouvrage contrôlé et flux séparés

Au CSR, la surface contributive est contrôlée et les flux sortants sont séparés (Q_{ruiss} et Q_{inf}). Surtout, un état hydraulique proche de zéro est observé entre événements (pluie nulle et débits quasi nuls), ce qui autorise un découpage plus strict. Un évènement est retenu seulement s'il est précédé d'une période suffisamment longue sèche et inactive (pluie et deux débits quasi nuls) et il se termine lorsque ces variables reviennent durablement vers cet état.

2.3.2 Signatures volumétriques : calcul de la pluie tombée et de la lame ruisseillée

Pour chaque évènement e , la pluie totale $h_p(e)$ est calculée par intégration temporelle sur $[t_0, t_1]$. Les débits observés sont intégrés sur la même fenêtre puis convertis en hauteurs équivalentes rapportées à la surface contributive A . Au Cloutasse, $h_r(e)$ correspond à la hauteur associée au débit à l'exutoire sur la fenêtre évènementielle. Au CSR, on calcule séparément les hauteurs associées au ruisseau rapide (Q_{ruiss}) et au flux drainé interne (Q_{inf}). Le nuage $h_r = f(h_p)$ est utilisé comme une signature globale (efficacité pluie-réponse, dispersion liée à l'état initial), en gardant à l'esprit que h_r dépend du découpage, et que Q_{inf} représente un flux drainé (vidange interne) plutôt qu'une infiltration pédologique. Ainsi ce découpage évènementiel fournit des fenêtres où des portions de décrue peuvent être isolées de manière cohérente.

2.3.3 Méthode d'identification des constantes de vidange

Dans cette section l'objectif est d'expliquer la méthode employée afin de calculer, directement à partir des observations de décrues, des constantes de vidange décrivant la décroissance des débits après une crue, un épisode pluvieux. Le principe est le même sur les deux sites : sur une portion de décrue suffisamment sèche et monotone, on suppose qu'un comportement de stockage linéaire effectif conduit à une décroissance quasi exponentielle,

$$Q(t) = Q_0 \exp(-k t) \iff \ln(Q(t)) = \ln(Q_0) - k t, \quad (2.9)$$

et l'on estime k par une régression linéaire de $\ln(Q)$ en fonction du temps. Dans ce travail, k est interprétée comme une constante temporelle : elle agrège des processus internes et dépend de la fenêtre retenue, mais fournit des ordres de grandeur robustes pour borner les paramètres de routage et de drainage du modèle.

La procédure est identique dans sa structure pour le Cloutasse et le CSR : (i) **détection** de segments candidats de décrue, (ii) **nettoyage** des segments pour garantir une décroissance exploitable, (iii) **ajustement** linéaire sur

$\ln(Q)$, (iv) **filtrage qualité** et stockage des constantes retenues.

Une décrue candidate est déclenchée au voisinage d'un maximum local de débit (pic), puis prolongée tant que l'on reste dans une période sèche (pluie nulle ou quasi nulle) et que le débit demeure strictement positif et significatif (au-dessus d'un seuil évitant le bruit).

Ensuite on exclut les points trop proches du pic (transitoires), les instants où la pluie résiduelle est non nulle, et les valeurs trop faibles qui rendent $\ln(Q)$ instable. La fenêtre est donc volontairement resserrée sur la portion où la décroissance est la plus proche d'une exponentielle.

Ensuite on ajuste sur les points retenus et on ne conserve que les cas où $k > 0$

$$\ln(Q) = a + b t, \quad k = -b, \quad (2.10)$$

Et enfin on filtre par qualité les segments, c'est à dire que ne sont conservés que les segments uniquement pour lesquels la décroissance est suffisamment linéaire en échelle log ($R^2 > 0.8$), afin de limiter l'influence du bruit et des ré-accelérations.

Cloutasse : constante de vidange d'exutoire sur Q unique. Au Cloutasse, on ne dispose que d'un débit à l'exutoire (ici noté Q , en pratique Q_{ls}). La constante estimée k est donc une constante de vidange à l'exutoire, qui combine des effets de transfert (propagation sur le réseau, contributions latérales) et de stockage (sol, versant). La difficulté principale est que l'état « nul » n'est pas bien défini : il existe un débit de base non nul, des périodes longues de faible débit proches du bruit, et une mémoire hydrologique qui peut se superposer à des pluies faibles. En conséquence, la détection et le nettoyage doivent rester plus tolérants : on cherche des portions de décrue cohérentes au sein d'une chronique naturelle parfois imparfaite, et l'on accepte que la constante soit une signature agrégée, sensible au niveau de débit et à la fenêtre analysée.

CSR : deux constantes accessibles, sur Q_{ruiss} et Q_{inf} . Au CSR, l'ouvrage est instrumenté et fournit deux signaux de sortie : le débit rapide Q_{ruiss} et le débit drainé interne Q_{inf} . La même méthode est appliquée séparément à ces deux signaux, ce qui permet d'estimer :

- une constante rapide k_{runoff} à partir des décrues de Q_{ruiss} , représentative de la vidange de la composante de transfert rapide (routage),
- une constante $k_{seepage}$ à partir des décrues de Q_{inf} , représentative de la **vidange interne** de l'ouvrage (drainage / percolation effective dans la structure).

De plus soulignons que les constantes de vidange estimées dans ce travail ne sont pas interprétées systématiquement comme des paramètres physiques uniques du système. Elles constituent des paramètres effectifs, au sens où elles agrègent plusieurs processus (stockage, transfert, connectivité hydraulique) et dépendent (i) de l'échelle temporelle considérée, (ii) de la fenêtre de décrue analysée, et (iii) de l'état hydrologique initial. Dans ce cadre, l'objectif n'est pas d'identifier une valeur « vraie » de k , mais de contraindre des ordres de grandeur temporels robustes (minutes, heures, jours) observables dans les données, qui servent ensuite de bornes plausibles pour la calibration des modèles continus.

2.4 Calibration : multistart, méthode de Powell et fonction objectif

La calibration automatique repose sur une fonction objectif et une recherche locale répétée depuis plusieurs points de départ (multistart). La méthode de Powell (`scipy.optimize.minimize`) est utilisée car le modèle est non-lisse par morceaux (seuils, saturations, min/max) et ne se prête pas facilement au calcul de dérivées stables. La calibration est réalisée en conservant une logique simple : (i) définir une fenêtre de calage, (ii) optimiser, (iii) resimuler et diagnostiquer avec des métriques complémentaires.

Fonction objectif : choix différent selon le site

Cloutasse : RMSE sur le log des débits. Sur le Cloutasse, les ordres de grandeur de débit varient fortement au cours du temps (crues rapides et phases de bas débits). Dans ce contexte, une RMSE calculée directement sur Q tend à être dominée par quelques pics, au détriment de la reproduction des phases plus modestes mais hydrologiquement informatives (début/fin d'événement, décrues). On utilise donc une RMSE sur les logarithmes :

$$J_{\text{Cloutasse}}(\boldsymbol{\theta}) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \left(\log(Q_{\text{mod}}(t; \boldsymbol{\theta}) + \epsilon) - \log(Q_{\text{obs}}(t) + \epsilon) \right)^2}, \quad (2.11)$$

où ϵ est une petite constante ($1e-6$) évitant les problèmes numériques lorsque $Q \rightarrow 0$. Cette formulation réduit l'influence disproportionnée des très forts débits et stabilise l'optimisation.

CSR : RMSE linéaire Au CSR, les débits sont exprimés en L/h et, surtout, les variations d'ordre de grandeur sont généralement plus limitées (le système est petit, instrumenté, et les débits restent dans une gamme plus resserrée qu'en bassin naturel). Dans ce cas, appliquer un logarithme peut sur-pondérer artificiellement les très faibles débits et déplacer l'objectif vers des écarts relatifs qui ne sont pas toujours les plus pertinents pour juger

le fonctionnement hydraulique. Il a donc été décidé d'utiliser une RMSE sur les débits pour le CSR :

$$J_{\text{CSR}}(\boldsymbol{\theta}) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (Q_{\text{mod}}(t; \boldsymbol{\theta}) - Q_{\text{obs}}(t))^2}. \quad (2.12)$$

2.5 Exploration finale : calibration continue et évaluation globale (CSR)

2.5.1 Cadre commun : utilisation du SCS continu comme “noyau” (modèle A)

La simulation annuelle sur chronique continue repose sur un principe simple : **tous les schémas (A à D) partagent le même module de production SCS continu**, et ne diffèrent ensuite que par la manière dont l'excédent produit est *transformé* en sorties observables (routage, séparation d'échelles de temps, cascade). Autrement dit, dans l'exploration finale, le **modèle A est utilisé comme noyau dynamique de bilan de masse**, au-dessus duquel on greffe (ou non) des opérateurs de transfert.

Forçages et état interne. À chaque pas de temps Δt (ici 120 s), le noyau SCS continu reçoit comme forçage : (i) la pluie incidente $P(t)$ (mm par pas), et (ii) un forçage lent d'assèchement via l'ETP (appliqué au réservoir d'abstraction h_a). L'état du système est porté par des stocks (en hauteur d'eau équivalente, mm ou m) :

$$\mathbf{x}(t) = (h_a(t), h_s(t), h_r(t)) \quad (\text{schéma A/B}) \quad \text{ou} \quad \mathbf{x}(t) = (h_a(t), h_s(t), h_{r1}(t), h_{r2}(t)) \quad (\text{schéma D}).$$

Ces stocks assurent la **mémoire hydrologique** : l'état à l'instant t dépend de l'histoire des pluies et des vidanges, ce qui est précisément ce qu'une approche événementielle ne peut pas garantir.

Production SCS continue : de la pluie brute à l'excédent. Le noyau A met en œuvre la logique SCS sous forme dynamique :

- **Abstraction initiale** : la pluie alimente d'abord $h_a \in [0, I_a]$. Tant que $h_a < I_a$, aucune pluie nette n'est produite. Dès que h_a atteint I_a , l'excédent constitue une pluie nette $q(t)$.
- **Stockage sol** : le réservoir $h_s \in [0, S]$ représente la rétention du sol (capacité S). Une infiltration potentielle v_{pot} est calculée (loi HSM) en fonction du taux de saturation h_s/S , puis **bornée** par l'eau effectivement disponible en surface, pour préserver la cohérence du bilan.
- **Vidange interne** : le stock de sol se vide par une loi linéaire effective (terme de *seepage*) contrôlée par k_{seepage} .

À l'issue de ces étapes, on obtient un **excédent non infiltré** (production de ruissellement) noté $r_{\text{gen}}(t)$, qui est *la seule chose* que le noyau A “fabrique” du point de vue ruissellement.

Du noyau (A) aux sorties observées : transfert vs production. La différence entre schémas se situe ensuite dans l'opérateur de transfert :

- **Schéma A** : la sortie est directement proportionnelle à $r_{\text{gen}}(t)$ (*production = transfert*), ce qui tend à produire une réponse trop instantanée .
- **Schéma B** : $r_{\text{gen}}(t)$ alimente un réservoir de routage h_r , et la sortie dépend de $r_{\text{out}}(t) = k_{\text{runoff}} h_r(t)$.
- **Schéma D (CSR)** : le routage rapide est représenté par une **cascade** $h_{r1} \rightarrow h_{r2}$, avec deux constantes ($k_{\text{runoff1}}, k_{\text{runoff2}}$), afin de capturer simultanément une montée/pic très rapide et une queue de décrue plus étalée.

Ainsi, dans l'exploration finale, **utiliser le SCS continu (modèle A) signifie** : (i) fermer un bilan de masse en continu via des stocks et des flux, (ii) propager un état interne cohérent d'un événement au suivant, et (iii) dissocier explicitement *production* (excédent) et *transfert* (routage), ce que le SCS événementiel ne fait pas.

Lien direct avec les observations CSR : deux sorties à comparer. Sur le CSR, ce cadre est particulièrement informatif car deux sorties sont observées :

$$Q_{\text{ruiss}}(t) \quad (\text{flux rapide}) \quad \text{et} \quad Q_{\text{inf}}(t) \quad (\text{flux drainé interne}).$$

Le noyau SCS continu fournit naturellement un flux interne simulé (terme *seepage*), utilisé comme **proxy** de la dynamique interne de l'ouvrage. L'exploration finale exploite donc le caractère multi-sorties du site pour limiter les compensations : un bon ajustement de Q_{ruiss} ne suffit pas si la dynamique est incohérente.

2.5.2 Période simulée et année hydrologique

La simulation continue CSR est réalisée sur l'année hydrologique 2022–2023, définie ici comme la période allant du 1^{er} octobre 2022 (00:00) au 30 septembre 2023 (23:59). Ce choix évite de couper artificiellement la phase de recharge automnale et permet d'évaluer le modèle sur un cycle complet incluant recharge (automne-hiver) et vidange (printemps-été). De plus, la période choisie n'englobe pas 2024 car le 15/03/2024 a eu lieu un curage du site CSR, ce qui empêche la comparaison avec les données précédent le curage.

2.5.3 Warm-up : neutraliser l'arbitraire des conditions initiales

Le modèle continu à réservoirs dépend des états initiaux des stocks (h_a, h_s, h_{r1}, h_{r2}), généralement inconnus. Un choix arbitraire (stocks nuls, stocks pleins) biaise fortement le début de simulation et peut contaminer la calibration en forçant l'optimisation à compenser un état initial faux.

Pour s'affranchir de ce problème, une phase de warm-up d'un mois est introduite au début de la fenêtre de calage : le modèle est simulé normalement, mais les pas de temps warm-up sont exclus de la fonction objectif. À l'issue du warm-up, les stocks ont convergé vers un état compatible avec les forçages (pluie, ETP synthétique appliquée à h_a), et l'évaluation/calibration devient beaucoup moins dépendante des conditions initiales.

2.5.4 Validation croisée temporelle (splits 6 mois)

La robustesse temporelle des paramètres est évaluée par une validation croisée simple sur deux demi-périodes :

- **H1** : du 01/10/2022 au 31/03/2023,
- **H2** : du 01/04/2023 au 30/09/2023.

Deux configurations sont testées : calage sur H1 et validation sur H2, puis calage sur H2 et validation sur H1. Pour chaque split, la simulation comprend : (i) warm-up (1 mois) au début de la période de calage, (ii) une fenêtre *objectif* (calage effectif après warm-up), (iii) une validation indépendante. Cette procédure teste explicitement si les paramètres identifiés sont *stables* et *prédictifs*, et non seulement ajustés opportunément à une période donnée.

2.5.5 Spécificité CSR : exploiter Q_{inf} pour contraindre les flux internes

La différence structurante entre le CSR et un bassin naturel classique est l'existence de **deux sorties observées** et séparées : un flux rapide Q_{ruiss} et un flux drainé interne Q_{inf} . Cette information additionnelle est déterminante car elle réduit une ambiguïté majeure des modèles pluie–ruissellement : sans observation de flux interne, l'optimisation peut obtenir un bon Q_{ruiss} en compensant numériquement (i) infiltration, (ii) stockage, (iii) routage, au prix d'un fonctionnement interne non réaliste. Ici, Q_{inf} sert de contrainte indépendante sur la dynamique/volumétrie interne.

2.5.6 Stratégie de calibration en 2 étapes

La calibration CSR est réalisée par une optimisation locale (Powell) répétée depuis plusieurs points de départ (multi-start), dans l'espace \log_{10} des paramètres, afin d'améliorer la robustesse face aux non-linéarités et aux seuils (min/max, saturations). La stratégie est hiérarchisée en deux étapes pour essayer d'éviter les compensations entre processus :

Étape 1 : calage des flux internes à partir de Q_{inf} . On identifie d'abord les paramètres contrôlant la dynamique interne : la capacité d'infiltration (paramètre k_{infiltr} , en m/s) et la vidange interne (constante k_{seepage} , en s^{-1}). L'objectif combine (i) un terme volumique pour garantir le bon ordre de grandeur des volumes drainés et (ii) un terme de forme en échelle logarithmique pour contraindre la dynamique (montée/queue), sans être dominé par quelques pics. Sur la fenêtre objectif (excluant warm-up), la fonction objectif de l'étape 1 s'écrit :

$$J_1(\theta) = w_V \frac{|V_{\text{inf,mod}} - V_{\text{inf,obs}}|}{V_{\text{inf,obs}}} + w_S \text{RMSE}(\ln(Q_{\text{inf,mod}} + \varepsilon), \ln(Q_{\text{inf,obs}} + \varepsilon)), \quad (2.13)$$

où $V_{\text{inf}} = \sum_t Q_{\text{inf}}(t) \Delta t$ est le volume drainé sur la fenêtre, ε est un petit offset (ici fixé à 0.1 L/h) pour stabiliser le logarithme près de zéro, et (w_V, w_S) sont des pondérations fixées (dans le script : $w_V = 0.35$, $w_S = 0.65$).

Ce choix marque une rupture nette avec la méthodologie suivie jusqu'à présent : au lieu d'ajuster le modèle uniquement sur Q_{ruiss} , on utilise d'abord Q_{inf} pour verrouiller le fonctionnement interne (volumes et temps caractéristiques) avant de s'attaquer au routage rapide.

Étape 2 : calage de la dynamique rapide sur Q_{ruiss} en figeant l'étape 1. Une fois ($k_{\text{infiltr}}, k_{\text{seepage}}$) identifiés, ils sont **figés**. On calibre ensuite la dynamique du ruissellement via les constantes de routage de la cascade à deux réservoirs ($k_{\text{runoff1}}, k_{\text{runoff2}}$), en minimisant principalement l'erreur sur Q_{ruiss} . Une faible pénalité sur la forme de Q_{inf} est conservée afin d'éviter de « casser » la cohérence interne obtenue à l'étape 1. Sur la fenêtre objectif :

$$J_2(\theta) = \text{RMSE}(Q_{\text{ruiss,mod}}, Q_{\text{ruiss,obs}}) + \lambda \text{RMSE}(\ln(Q_{\text{inf,mod}} + \varepsilon), \ln(Q_{\text{inf,obs}} + \varepsilon)), \quad (2.14)$$

où λ est petit (dans le script : $\lambda = 0.10$). Cette étape cible la restitution fine de la forme des hydrogrammes ruisselés (pente de montée, temps de réponse, décroissance rapide et queue), tout en conservant la contrainte interne.

2.5.7 Bornes, paramètres fixés et cohérence avec les signatures indépendantes

Afin de limiter une calibration purement numérique, plusieurs éléments sont fixés ou bornés par des ordres de grandeur issus des analyses indépendantes (décrues, comportement du site) : (i) les paramètres de stockage I_a et S sont fixés (dans le script : $I_a = 0.002$ m, $S = 0.13$ m), (ii) k_{infiltr} est borné dans une plage compatible avec l'ouvrage (ici 0.2 à 5 mm/h convertis en m/s), (iii) les constantes de routage ($k_{\text{runoff1}}, k_{\text{runoff2}}$) sont bornées autour de valeurs centrales cohérentes avec des temps de demi-vie de l'ordre de quelques minutes, en cohérence avec les constantes observées sur décrues de Q_{ruiss} . L'optimisation est réalisée en variables \log_{10} afin d'explorer efficacement des ordres de grandeur.

2.5.8 Simulation continue : calage puis validation avec conditions initiales cohérentes

Après optimisation, une simulation complète est reconstruite pour chaque split. La période de calage est simulée depuis des conditions initiales nulles, et l'état final des stocks (h_a, h_s, h_{r1}, h_{r2}) à la fin du calage est réutilisé comme condition initiale de la validation. Ce point est essentiel : la validation n'est pas une resimulation « remise à zéro », mais une continuation du système, cohérente avec l'idée de mémoire hydrologique.

Les résultats sont ensuite évalués par des métriques calculées séparément sur : (i) 6 mois (warm-up inclus, pour contrôle), (ii) 6 mois - 1 mois (fenêtre réellement utilisée dans l'objectif), (iii) 6 mois suivant (période indépendante). Les diagnostics incluent RMSE, NSE, KGE, biais, ratios de volumes et bilans mensuels, afin de distinguer clairement ajustement et pouvoir prédictif.

2.5.9 En quoi cette approche diffère de la méthodologie précédente

Jusqu'ici, la calibration était principalement centrée sur la reproduction de Q_{ruiss} (ou d'un débit unique à l'exutoire en bassin naturel), ce qui laisse une marge importante aux compensations internes : un modèle peut reproduire un hydrogramme de sortie acceptable tout en mobilisant des stocks et des flux internes irréalistes. Au CSR, l'existence de Q_{inf} permet d'introduire une contrainte directe sur la dynamique interne, ce qui justifie une stratégie hiérarchisée en deux étapes : d'abord contraindre les volumes et la cinétique du drainage interne (via Q_{inf}), puis ajuster le transfert rapide (via Q_{ruiss}). Cette séparation améliore l'interprétabilité des paramètres et réduit le risque d'équifinalité, tout en restant compatible avec une calibration continue sur chronique longue.

Chapter 3

Résultats

3.1 Signatures observées : bassin du Cloutasse

Cette section présente les signatures hydrologiques extraites directement des observations sur le bassin du Cloutasse, indépendamment de toute calibration de modèle. Deux types de signatures sont analysés : (i) la relation évènementielle pluie–ruissellement $h_r = f(h_p)$, et (ii) les constantes de vidange estimées à partir des phases de décrue. L'objectif n'est pas d'identifier des paramètres « physiques » uniques, mais de caractériser des ordres de grandeur robustes des volumes et des échelles de temps dominantes, qui serviront ensuite à borner et interpréter les paramètres du modèle SCS continu.

3.1.1 Relation évènementielle pluie–ruissellement $h_r = f(h_p)$

Pour chaque événement pluie–ruissellement identifié (Section 2.3), la pluie totale h_p et la hauteur de ruissellement équivalente h_r sont calculées par intégration temporelle sur la fenêtre évènementielle. Le nuage de points $h_r = f(h_p)$ constitue une signature globale de l'efficacité de transformation de la pluie en ruissellement.

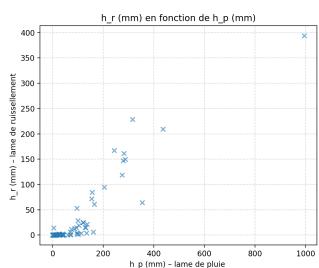


Figure 3.1 – Cloutasse : cumul de pluie en fonction du cumul ruissellé

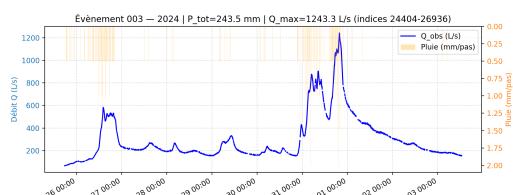


Figure 3.2 – Exemple d'évènement découpé

La Figure 3.1 présente, pour chaque événement pluie–ruissellement isolé selon la procédure décrite en Section 2.3, la relation entre la pluie cumulée sur l'évènement h_p et la lame d'écoulement évènementielle h_r . Ces deux grandeurs sont obtenues par intégration temporelle des séries observées sur la fenêtre $[t_0, t_1]$; ce graphique constitue donc une *signature* indépendante de toute modélisation, et non une sortie du schéma SCS continu.

L'objectif initial de cette représentation était d'identifier un comportement évènementiel simple, par exemple l'existence d'un seuil de déclenchement ou d'une rupture de pente traduisant une transition nette vers un régime

plus ruisselant. Or, le nuage de points ne met pas en évidence de relation fonctionnelle unique : pour des valeurs de h_p comparables, h_r peut varier de manière importante. Cette dispersion est interprétée ici avec prudence comme l'expression de la variabilité des conditions antécédentes (état hydrique initial, niveau des stockages, débit de base) et de la connectivité hydrologique, plutôt que comme un simple bruit de mesure.

L'absence de rupture de pente marquée est par ailleurs cohérente avec un fonctionnement de bassin à dominante forestière, où l'interception, l'infiltration et les stockages internes tendent à amortir la réponse et à rendre le déclenchement du ruissellement moins "seuil-dépendant" que dans des milieux plus imperméables. En conséquence, la Figure 3.1 est mobilisée ici comme un diagnostic global (variabilité pluie-réponse, rôle des états initiaux) et comme un ordre de grandeur des volumes événementiels, plutôt que comme une loi prédictive événementielle.

3.1.2 Constantes de vidange issues des décrues

Sur le bassin du Cloutasse, l'analyse des phases de décrue extraites de la chronique continue conduit à 185 segments exploitables, définis comme des portions post-pic en période sèche, monotones et suffisamment linéaires en échelle semi-log pour permettre une régression de $\ln(Q)$ en fonction du temps. La signature dominante est sans ambiguïté : 182/185 décrues (98.4 %) sont décrites de manière satisfaisante par un seul régime exponentiel (simple pente), tandis que 3/185 (1.6 %) nécessitent deux régimes (double pente), traduisant une transition entre une composante initiale plus rapide et une composante plus lente (Tab. A.2).

En termes d'ordres de grandeur, les décrues à un régime couvrent $k \in [1.9 \times 10^{-6} ; 3.3 \times 10^{-4}] \text{ s}^{-1}$, soit des demi-vies $t_{1/2} = \ln(2)/k$ allant d'environ 90 h (soit ~ 4 jours) à 0.6 h (soit ~ 36 minutes). Les décrues à deux régimes isolent une échelle rapide plus contrainte, avec $k \in [6.3 \times 10^{-5} ; 7.0 \times 10^{-4}] \text{ s}^{-1}$, soit $t_{1/2} \in [3.1 ; 0.28] \text{ h}$ (environ 3 h à 17 min) (Tab. A.2).

Il est important de souligner que, sur un bassin naturel, le débit Q observé à l'exutoire agrège à la fois des effets de transfert (surface/réseau) et des contributions issues de stockages internes. Ainsi, ces constantes k ne peuvent pas être assimilées à des paramètres physiques uniques, mais constituent des contraintes temporelles robustes pour borner la calibration des modèles continus. Dans la suite, la plage rapide issue des décrues à double pente fournit des bornes pour le paramètre de routage k_{runoff} (temps caractéristiques de l'ordre de la dizaine de minutes à quelques heures), tandis que la partie lente de la distribution à un régime contraint le paramètre de vidange interne k_{seepage} (temps caractéristiques de l'ordre de l'heure à la dizaine de jours). Ces bornes ont pour but de contraindre l'optimisation, pour que la calibration ne détourne un paramètre pour reproduire artificiellement un routage rapide, ou inversement n'éteigne le transfert de surface sur des échelles de temps incompatibles avec les décrues observées.

3.2 Signatures observées : bassin du CSR

Contrairement au bassin naturel du Cloutasse, le site CSR constitue un système hydraulique fortement instrumenté et quasi fermé, pour lequel la pluie incidente et les flux sortants sont mesurés avec une bonne résolution temporelle. Cette configuration permet d'extraire des signatures observées plus directement interprétables, en particulier sur les dynamiques de vidange et sur les flux dits d'infiltration, au sens opérationnel défini précédemment.

3.2.1 Relation événementielle pluie–ruissellement $h_r = f(h_p)$

La Figure A.1 présente la relation événementielle entre la pluie cumulée h_p et la lame de ruissellement rapide h_r , pour les événements isolés sur le site CSR selon la procédure décrite en Section 2.3. Comme pour le bassin du Cloutasse, ces grandeurs sont obtenues par intégration temporelle des observations sur la fenêtre événementielle $[t_0, t_1]$; la figure ne résulte donc pas d'une modélisation, mais constitue une signature directement extraite des données.

Contrairement au bassin naturel, le nuage de points apparaît globalement plus resserré, ce qui reflète le caractère contrôlé de l'ouvrage : surface contributive strictement définie, absence de processus versant complexes, et retour fréquent vers un état hydraulique proche de zéro entre événements. Cette structuration plus contrainte limite la variabilité liée aux contributions latérales et à la mémoire hydrologique lointaine, et conduit à une relation pluie-réponse plus cohérente à l'échelle événementielle.

Néanmoins, une dispersion non négligeable subsiste. À pluie cumulée comparable, les volumes ruissellés peuvent varier sensiblement, ce qui traduit principalement la variabilité de l'état interne de la structure au début de l'événement (niveau de remplissage résiduel, saturation partielle, vidanges incomplètes). Cette dispersion souligne que, même dans un système instrumenté et quasi fermé, la réponse événementielle ne peut être décrite par une relation déterministe unique entre h_p et h_r .

Dans ce contexte, la Figure A.1 est utilisée comme une signature diagnostique permettant (i) de comparer les ordres de grandeur des volumes événementiels, (ii) de mettre en évidence l'influence des conditions initiales internes, et (iii) de fournir un cadre de cohérence pour l'interprétation et le bornage des paramètres du modèle continu. Elle ne vise pas à établir une loi pluie–ruissellement prédictive, mais à caractériser le fonctionnement global de l'ouvrage avant toute calibration.

3.2.2 Constantes de vidange issues des décrues

Sur le site CSR, l'analyse des décrues est conduite séparément sur les deux flux observés, le ruissellement rapide Q_{ruiss} et le débit drainé interne Q_{inf} . Cette configuration instrumentée, avec un retour fréquent à un état quasi nul entre événements, permet une identification plus stricte et plus directement interprétable des constantes de vidange que dans le cas d'un bassin naturel.

Au total, 51 segments exploitables sont identifiés sur les décrues de Q_{ruiss} et 272 segments sur les décrues de Q_{inf} , après application de critères stricts (période sèche, décroissance monotone, seuil minimal de débit et qualité de l'ajustement linéaire en échelle logarithmique ; Tab. A.3). Les constantes estimées mettent en évidence une séparation nette d'échelles de temps entre la dynamique rapide et la dynamique interne de l'ouvrage.

Pour le ruissellement rapide, les constantes k_{runoff} issues des décrues de Q_{ruiss} s'échelonnent entre 8.26×10^{-4} et $4.02 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, avec une valeur médiane $k_{\text{med}} \simeq 2.11 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$. Ces valeurs correspondent à des demi-vies $t_{1/2} = \ln(2)/k$ comprises entre 14.0 min et 2.9 min, pour une médiane d'environ 5.5 min. Ces temps caractéristiques confirment le comportement très réactif de l'ouvrage et bornent directement le paramètre de routage rapide des modèles continus (k_{runoff} , ou $(k_{\text{runoff1}}, k_{\text{runoff2}})$ dans le cas d'une cascade).

À l'inverse, les décrues du débit drainé interne Q_{inf} conduisent à des constantes k_{seepage} nettement plus faibles, comprises entre 1.30×10^{-5} et $8.32 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$, avec une médiane $k_{\text{med}} \simeq 6.50 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$. Les demi-vies associées s'étendent ainsi de 14.8 h à 0.23 h, avec une valeur médiane proche de 3.0 h. Cette plage temporelle est cohérente avec un drainage interne retardé de la structure, distinct d'une infiltration instantanée, et caractérise la mémoire hydraulique propre de l'ouvrage.

Contrairement au bassin naturel, la dissociation explicite des flux au CSR permet donc d'associer sans ambiguïté les constantes rapides aux paramètres de routage (k_{runoff}) et les constantes lentes au paramètre de vidange interne (k_{seepage}). Dans la suite, ces résultats sont utilisés comme bornes de travail directes pour la calibration : les paramètres de routage sont contraints à produire des temps caractéristiques de l'ordre de quelques minutes, tandis que k_{seepage} est borné de manière à imposer une inertie de l'ordre de l'heure. Cette hiérarchisation empêche que la calibration n'explique la dynamique rapide par une vidange interne artificiellement accélérée, ou inversement ne reproduise le drainage interne au moyen d'un simple lissage du ruissellement rapide.

3.3 Performances des schémas

3.3.1 Cloutasse : effet des extensions (A → B → C)

Les résultats présentés ici ont été sélectionnés afin d'essayer de donner une vue globale dans un premier temps, sur la modélisation au niveau événementiel. Les simulations des figures 3.3, 3.4 et 3.5 sont faites sur le même événement et permettent la discussion. Ainsi donc sur la figure 3.3 on observe le résultat de la calibration à partir du modèle A. Il apparaît clair que l'on a besoin de rajouter un réservoir dans le but de lisser le débit produit à l'exutoire, et donc se rapprocher de la réalité. La figure 3.4 présente un résultat obtenu par le modèle B, avec un réservoir de routage de surface. La constante de vidange utilisée comme borne centrale pour la calibration est celle identifiée en 2.3.3 (à savoir un temps de vidange correspondant à 1h). A ce stade les résultats issus de la calibration ne donnent pas de ratio $V_{\text{obs}}/V_{\text{modélisé}}$ satisfaisant.

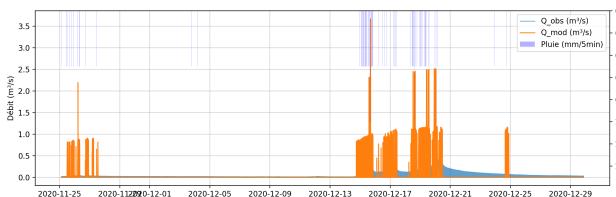


Figure 3.3 – Cloutasse : schéma A

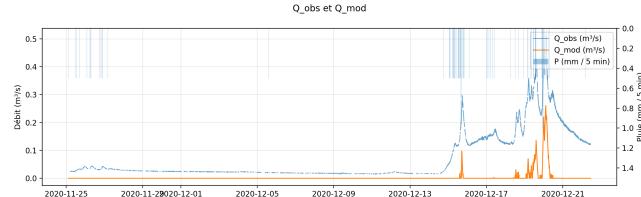


Figure 3.4 – Cloutasse : schéma B

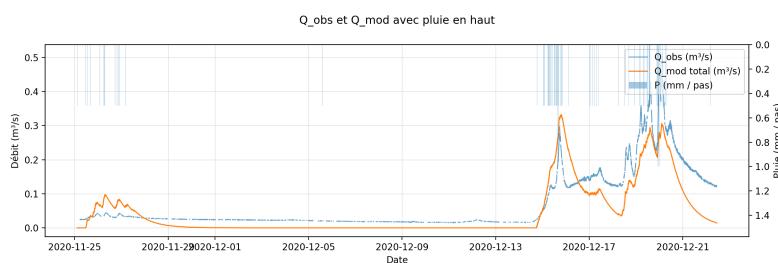


Figure 3.5 – Cloutasse : schéma C

Ces résultats confirment que, sur le bassin du Cloutasse, la limitation principale du schéma A est l'absence de temps de transfert explicite. L'introduction d'un routage (schéma B) améliore la forme de l'hydrogramme, mais ne suffit pas à garantir une restitution volumique satisfaisante. L'ajout d'une voie lente (schéma C) permet de mieux représenter certaines queues de décrue, au prix toutefois d'une identifiabilité plus fragile des paramètres internes. Si le schéma C permet théoriquement de représenter deux échelles de temps distinctes, son application au bassin

du Cloutasse met en évidence une limite d'identifiabilité. En l'absence de flux interne observé, la séparation entre la voie rapide et la voie lente repose uniquement sur la forme du débit à l'exutoire, ce qui laisse une large place aux compensations entre k_{runoff} , k_{sub} et α_{sub} .

Ainsi, plusieurs combinaisons de paramètres peuvent produire des hydrogrammes visuellement comparables, mais avec des fonctionnements internes très différents. Ce constat confirme que l'ajout d'une complexité structurelle n'améliore la représentation que si les données disponibles permettent de la contraindre.

3.3.2 CSR : effet des extensions (A → B → D)

Pour le site CSR, les paramètres ont été bornés de manière à rester cohérents avec les signatures observées (Section 3.2), en particulier les constantes de décrue estimées sur Q_{ruiss} et Q_{inf} (Table A.3). Les paramètres de stockage sont fixés avec $I_a = 0.002$ m et $S = 0.13$ m.

Après analyse de la quantité d'eau tombée au cours de chaque évènement, les bornes de la constante d'infiltration k_{infiltr} sont entre 0.2 et 5 mm/h, soit $k_{\text{infiltr}} \in [5.6 \times 10^{-8} ; 1.4 \times 10^{-6}]$ m/s plage compatible avec le fonctionnement d'un ouvrage drainant à l'échelle minute-heure, et permettant d'explorer des conditions allant d'une infiltration limitée (saturation rapide et ruissellement plus fréquent) à une infiltration plus efficace (réponse majoritairement drainée).

La vidange interne k_{seepage} est contrainte à un ordre de grandeur cohérent avec les décrues de Q_{inf} (Table A.3), dont les demi-vies sont typiquement de l'ordre de l'heure (avec une variabilité observée). En pratique, on retient une plage de travail centrée sur 10^{-5} à 10^{-4} s $^{-1}$, ce qui garantit que le flux interne modélisé présente une inertie cohérente avec un drainage mesuré en sortie de structure plutôt qu'avec une infiltration instantanée.

Pour la dynamique rapide, les constantes de routage sont bornées à partir des décrues de Q_{ruiss} (Table A.3), qui indiquent des temps caractéristiques de quelques minutes (typiquement $t_{1/2} \approx 3$ à 14 min). On impose donc, au schéma B, une plage sur k_{runoff} cohérente avec 10^{-3} s $^{-1}$, et, au schéma D, des plages analogues sur ($k_{\text{runoff1}}, k_{\text{runoff2}}$) afin que la cascade de deux réservoirs reste dans le régime temporel observé.

Les résultats confirment ensuite un diagnostic structurel net. Le schéma A (Annexe, Fig. A.4) présente une réponse trop "instantanée" : le débit modélisé réagit de manière abrupte dès que l'excédent non infiltré apparaît, car la génération et le transfert sont confondus. Cette limite se traduit par une incapacité à reproduire une forme d'hydrogramme réaliste (pente de montée et décrue) lorsque l'on compare qualitativement les séries observées et modélisées.

L'introduction d'un réservoir de routage au schéma B (Annexe, Fig. A.5) améliore la restitution en imposant une échelle de temps explicite : la montée est moins brutale et la réponse est lissée. Néanmoins, un seul temps caractéristique reste souvent insuffisant sur cet ouvrage très réactif : la reproduction simultanée de la pente initiale et de la queue de décrue demeure imparfaite, ce qui est cohérent avec la dynamique très rapide mise en évidence par les décrues de Q_{ruiss} .

Le schéma D (Annexe, 2.4) corrige ce verrou en remplaçant le routage unique par une cascade de deux réservoirs en série. Cette structure permet de représenter une réponse rapide suivie d'une décroissance plus progressive, sans introduire de processus supplémentaires : un premier réservoir absorbe la brusquerie initiale, tandis qu'un second réservoir porte une composante plus étalée. Sur l'évènement illustré (Annexe, Fig. Fig. A.3), la dynamique est visiblement mieux restituée (montée, pic et retour), ce qui justifie l'emploi du schéma D dans la simulation continue et la calibration annuelle qui suivent.

Enfin, la spécificité du CSR est l'existence d'une sortie interne observée Q_{inf} , qui réduit fortement l'équifinalité : les signatures montrent une séparation d'échelles de temps entre Q_{ruiss} (minute) et Q_{inf} (heure), ce qui motive une calibration hiérarchisée où l'on constraint d'abord les paramètres internes ($k_{\text{infiltr}}, k_{\text{seepage}}$) via Q_{inf} , puis les paramètres de routage rapide via Q_{ruiss} . Dans ce cadre, la cohérence des bornes (temps caractéristiques observés) et de la structure (cascade au schéma D) constitue un élément central pour interpréter les paramètres au-delà d'un simple ajustement numérique.

3.4 Calibration annuelle

L'objectif de cette section est de formaliser de manière reproductible la procédure de calage en régime continu appliquée au site CSR sur une année hydrologique, en s'appuyant sur (i) un noyau SCS continu (production) et (ii) un opérateur de transfert (routage) adapté aux dynamiques à l'échelle de la minute. La stratégie combine une validation croisée temporelle, une phase de warm-up pour neutraliser l'arbitraire des conditions initiales, et une optimisation multi-start par la méthode de Powell dans l'espace des ordres de grandeur.

3.4.1 Modèle SCS continu sans routage

Sur la simulation continue CSR (année hydrologique 2022–2023), le modèle SCS continu sans routage reproduit imparfaitement la dynamique temporelle du ruissellement, malgré une restitution volumique globalement du bon ordre de grandeur. D'un point de vue "performance temporelle", les métriques mensuelles mettent en évidence une forte instabilité : sur les 10 mois où la NSE est calculable, la moyenne est d'environ $\text{NSE} \approx -0.92$, avec un minimum très dégradé en décembre ($\text{NSE} \approx -4.28$) et seulement deux mois légèrement positifs (avril $\text{NSE} \approx 0.24$; mai $\text{NSE} \approx 0.22$) (Fig. 3.6). Les KGE mensuels sont en revanche souvent positifs (médiane ≈ 0.19 , maximum ≈ 0.49), ce qui indique que le modèle peut parfois respecter une partie de la variabilité globale et/ou du biais

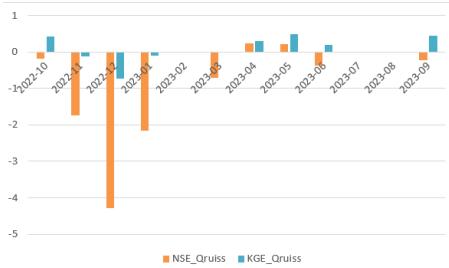


Figure 3.6 – répartition mensuelle des NSE et KGE avec modélisation annuelle (modèle A étendu)

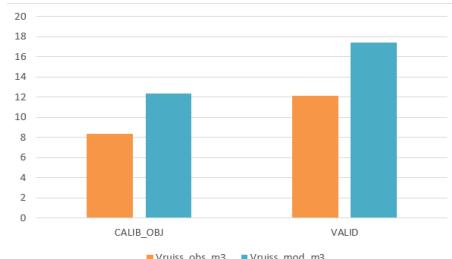


Figure 3.7 – Ratio des volumes modélisé et observé entre la période H1 (calibration) et H2 (validation)

moyen, tout en échouant sur la chronologie fine (pics, timing et intermittence) là où la NSE est très pénalisante (Fig. 3.6). La figure événementielle illustre bien le biais structurel : le débit modélisé apparaît sous forme de pics très impulsionsnels et discontinus, typiquement “en peigne”, alors que l’observé présente une réponse plus lisse et persistante (Fig. évènement `event_2022_044`). Cette signature est typique d’un schéma où la sortie est trop directement liée à la production instantanée (absence d’un temps de transfert explicite), ce qui rend difficile la reproduction simultanée de la montée, du pic et de la décrue à pas de temps fin. Sur le plan volumique, le diagnostic est plus favorable mais révèle un biais systématique d’excès : (i) le bilan global “calage/validation” montre des volumes ruissellés modélisés supérieurs aux volumes observés (Fig. barres volumes), et (ii) le nuage *Vruiss mod* vs *Vruiss obs* se situe majoritairement au-dessus de la diagonale 1:1, ce qui confirme une tendance générale à surproduire du ruissellement (Fig. ??). En résumé, ce SCS “pur” semble capable d’approcher des ordres de grandeur de volumes sur certains épisodes, mais il présente un verrou structurel : sans routage, la réponse reste trop “instantanée”, ce qui dégrade fortement les métriques temporelles (NSE négatives la plupart du temps) et produit des hydrogrammes peu réalistes à l’échelle 2 minutes.

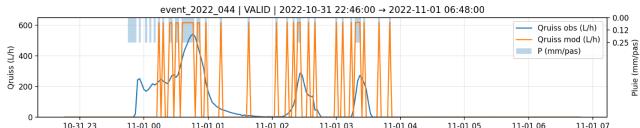


Figure 3.8 – Exemple d’un évènement issu de la procédure de calibrage

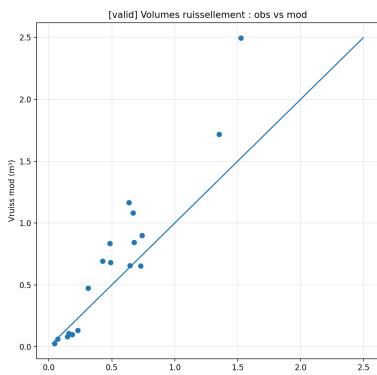


Figure 3.9 – Volume observé en fonction du volume modélisé pour chaque évènement

La lecture conjointe des métriques mensuelles (Fig. 3.6), des bilans volumiques (Fig. 3.7) et des sorties événementielles (Fig. 3.8 et Fig. 3.9) met en évidence un comportement structurellement limitant du SCS continu sans routage. Les performances temporelles sont très instables : la majorité des mois présente des NSE négatives, avec une moyenne fortement dégradée, traduisant une incapacité du modèle à reproduire correctement la chronologie fine des écoulements. À l’inverse, les KGE mensuelles sont plus souvent positives, ce qui indique que certaines composantes globales (biais moyen, variabilité agrégée) peuvent être partiellement respectées malgré une dynamique incorrecte.

Cette dissociation nette entre métriques temporelles et métriques globales montre que le modèle peut fermer un bilan volumique d’ordre de grandeur acceptable, tout en produisant une dynamique hydrologique irréaliste. Les hydrogrammes événementiels confirment ce diagnostic : le débit modélisé apparaît sous forme de pics très impulsionsnels, directement synchronisés avec la production instantanée d’excédent, alors que les observations présentent des réponses plus progressives et des queues de décrue persistantes (Fig. 3.8). Ce comportement est typique d’un schéma où la génération et le transfert sont confondus, sans temps de propagation explicite.

Le nuage des volumes ruissellés modélisés en fonction des volumes observés (Fig. 3.9) se situe majoritairement au-dessus de la diagonale 1:1, ce qui révèle une tendance systématique à la surproduction du ruissellement. Cette surestimation n’est pas uniforme : elle est particulièrement marquée pour les événements de faible à moyenne ampleur, tandis que les événements les plus importants sont relativement mieux reproduits. Ce comportement suggère que le schéma A transforme trop efficacement l’excédent en sortie observable, sans modulation suffisante par l’état interne du système.

Ainsi, même lorsque les volumes intégrés par événement sont proches des observations, la dynamique interne reste incohérente, ce qui explique la coexistence de bilans volumiques raisonnables et de performances temporelles très dégradées.

3.4.2 Modèle modifié à deux réservoirs (schéma D)

Les limitations mises en évidence avec le SCS continu sans routage motivèrent l'introduction explicite de temps de transfert au moyen d'un routage en cascade à deux réservoirs (schéma D), spécifiquement adapté au site CSR. Cette section analyse les résultats de la calibration annuelle et de la validation croisée temporelle, en s'appuyant conjointement sur les métriques globales, les diagnostics événementiels et les paramètres identifiés.

Stabilité temporelle des performances

La Figure 3.13 présente l'évolution mensuelle des métriques NSE et KGE pour la simulation annuelle CSR (année hydrologique 2022–2023), en distinguant les périodes de calage et de validation. Contrairement au SCS continu sans routage, les performances restent du même ordre de grandeur entre les deux demi-périodes.

Les NSE mensuelles ne présentent pas d'effondrement systématique lors du passage en validation, et les KGE mensuelles demeurent relativement stables. Ce comportement indique que la dynamique temporelle du ruissellement (périodes actives, intermittence, synchronisation pluie–réponse) est correctement transférée d'une demi-saison à l'autre. Du point de vue temporel, le schéma D ne présente donc pas de sur-ajustement manifeste et conserve un pouvoir prédictif robuste en régime continu.

Analyse volumique événementielle

La Figure 3.12 met en relation les volumes ruissellés observés et modélisés pour chaque évènement, en distinguant calage et validation. En période de calage, les volumes sont globalement bien restitués, avec des ratios $V_{\text{ruiss,mod}}/V_{\text{ruiss,obs}}$ proches de l'unité.

En revanche, en validation, les points se situent majoritairement sous la diagonale 1:1, ce qui traduit une sous-estimation systématique des volumes ruissellés. Ce biais volumique n'est pas homogène : les évènements les plus marqués sont relativement mieux reproduits, tandis que les évènements de faible à moyenne ampleur présentent une sous-restitution plus prononcée. Ce diagnostic volumique contraste avec la stabilité des métriques temporelles et met en évidence une limite spécifique du modèle en validation croisée. Cette limite est certainement celle d'une signature saisonnière non négligeable.

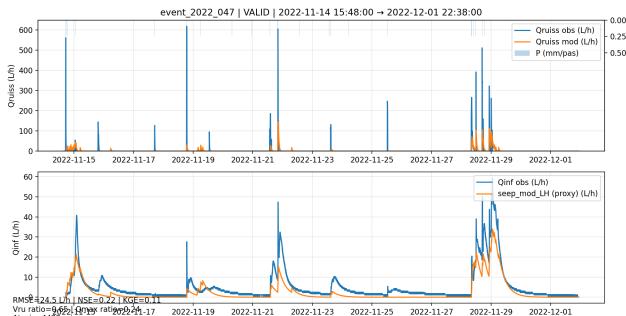


Figure 3.10 – évènement issu de la procédure de calibrage validée

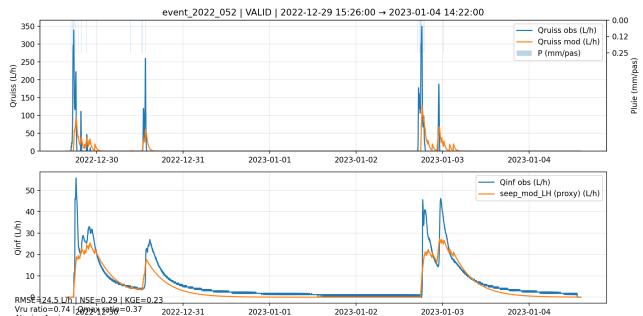


Figure 3.11 – évènement issu de la procédure de calibrage validée

Lecture des hydrogrammes événementiels

Les hydrogrammes événementiels illustrés (Fig. 3.10 et Fig. 3.11) permettent de compléter l'analyse des métriques globales. Ils montrent que, même en validation, la forme des réponses hydrologiques est correctement reproduite : la montée est temporisée, le pic est positionné de manière réaliste, et la décrue présente une décroissance progressive.

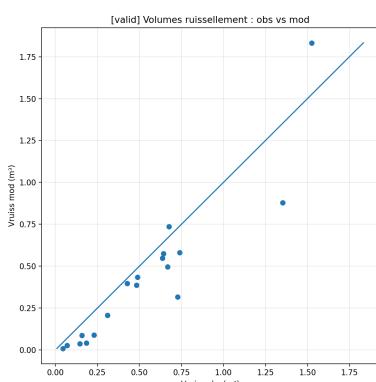


Figure 3.12 – Volume observé en fonction du volume modélisé pour chaque évènement

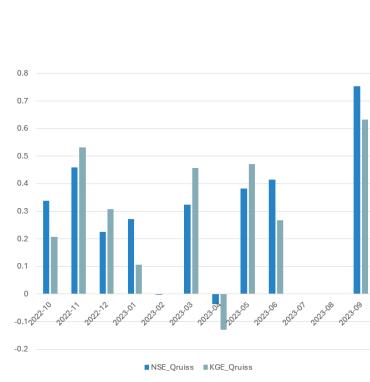


Figure 3.13 – Métriques (KGE et NSE) mensuelles

Ces résultats confirment que la cascade de deux réservoirs permet de représenter simultanément une réponse très rapide et une queue de décrue plus étalée, en cohérence avec les échelles de temps identifiées indépendamment sur les décrues observées du ruissellement. L'amélioration apportée par le schéma D est donc structurelle et ne se

limite pas à quelques évènements particuliers.

Interprétation hydrologique de la validation croisée

La comparaison entre les configurations H1→H2 et H2→H1 (Tab. A.4) met en évidence une hiérarchie claire entre paramètres. Les constantes associées aux temps caractéristiques rapides ($k_{runoff1}$) et à la vidange interne ($k_{seepage}$) sont remarquablement stables entre les deux demi-périodes, ce qui suggère qu'elles constituent des signatures structurelles du site CSR.

À l'inverse, les paramètres contrôlant la partition infiltration–ruissellement et la composante lente du routage présentent une variabilité marquée selon le sens de la validation croisée. Cette sensibilité se traduit directement par un biais volumique en validation, sans dégradation majeure de la dynamique temporelle.

Ces résultats indiquent que le modèle est capable de prédire correctement *quand* l'eau s'écoule, mais reste sensible au contexte hydrologique saisonnier pour prédire *combien* s'écoule. La validation croisée révèle ainsi une non-stationnarité effective du système, plutôt qu'un défaut de cohérence du schéma D.

Chapter 4

Conclusion et perspectives

L'objectif de ce projet de fin d'étude était d'examiner, dans un cadre appliqué, dans quelle mesure une formulation continue inspirée du modèle SCS–CN pouvait être utilisée pour analyser des séries hydrologiques longues à pas de temps fin, tout en conservant une structure conceptuelle simple et interprétable. Le travail a été conduit dans un contexte d'ingénierie en sciences et technologies de l'eau, avec une attention particulière portée à la cohérence des bilans, à la lisibilité des paramètres et à la confrontation systématique du modèle aux observations disponibles.

L'approche a été appliquée à deux systèmes volontairement contrastés : un bassin versant naturel (Cloutasse), pour lequel l'observation se limite à un débit à l'exutoire et où la mémoire hydrologique est importante, et un ouvrage urbain expérimental fortement instrumenté (CSR), où la surface contributive et les flux sortants sont connus et mesurés séparément. Ce second site constitue un cadre particulièrement adapté pour tester un modèle conceptuel en régime continu, dans la mesure où il permet de limiter certaines ambiguïtés classiques liées aux compensations internes.

Les résultats obtenus montrent que la formulation SCS continue minimale, lorsqu'elle est utilisée sans représentation explicite des temps de transfert, présente des limites importantes à pas de temps fin. Sur le site CSR, cette configuration conduit à des réponses trop abruptes et à des performances temporelles instables, malgré des volumes parfois du bon ordre de grandeur. Ce constat met en évidence, de manière concrète, la nécessité de dissocier la production de ruissellement des mécanismes de transfert vers les sorties observées lorsqu'on cherche à travailler en régime continu.

L'introduction de temps de transfert explicites, au moyen d'un routage en cascade à deux réservoirs (schéma D), améliore sensiblement la cohérence des simulations sur le site CSR. Dans ce cadre, le modèle est capable de reproduire la dynamique générale des écoulements observés, avec des hydrogrammes plus réalistes et des métriques temporelles plus stables, y compris lors de la validation sur une période indépendante. Ces résultats suggèrent que, sur un ouvrage urbain très instrumenté, une extension limitée du SCS vers un cadre continu peut constituer un outil opérationnel pertinent pour représenter les écoulements en régime continu, à condition d'introduire explicitement des échelles de temps de transfert.

La validation croisée temporelle met néanmoins en évidence des limites persistantes, en particulier sur la restitution des volumes ruissellés en validation. Les paramètres associés aux temps caractéristiques rapides et à la vidange interne apparaissent relativement stables, tandis que les paramètres contrôlant la partition infiltration–ruissellement présentent une sensibilité marquée au contexte hydrologique de la période de calage. Ce résultat indique que l'hypothèse d'un jeu de paramètres unique, valable sur l'ensemble de l'année hydrologique, peut être trop simplificatrice, même dans un système fortement contrôlé.

Dans cette optique, la calibration croisée ne doit pas être interprétée comme une validation définitive du modèle, mais comme un outil permettant de mieux comprendre les conditions dans lesquelles ses paramètres restent robustes, et celles pour lesquelles ils deviennent dépendants du contexte saisonnier. Elle met en lumière le besoin d'analyser plus finement la variabilité intra-annuelle des processus, notamment pour améliorer la restitution des volumes, sans remettre en cause la structure générale du modèle.

Les perspectives ouvertes par ce travail sont donc avant tout méthodologiques. Un affinage saisonnier des paramètres, ou une paramétrisation dépendante de l'état hydrique, constitue une piste cohérente pour prolonger l'analyse. De même, l'exploitation de chroniques plus longues et l'élargissement de la validation croisée permettraient de mieux caractériser la stabilité des paramètres et leurs domaines de validité.

En conclusion, ce travail montre que le modèle conceptuel élaboré par l'équipe de HSM confronté à des données fortement instrumentées, peut fournir une représentation raisonnable des écoulements observés en régime continu. Les limites identifiées ne constituent pas des échecs, mais des enseignements utiles pour définir les conditions d'utilisation et les axes d'amélioration d'un SCS continu, que ce soit dans un contexte d'ingénierie hydrologique ou bien dans un cadre universitaire.

Appendix A

Annexes

A.1 Vue d'ensemble des schémas A à D

Table A.1 – Tableau A.1 – Progression contrôlée des schémas SCS continus (A à D) : noyau commun, sorties visées, et paramètres/états ajoutés d'un modèle au suivant. Les schémas partagent un module de *production* SCS continue (abstraction h_a , sol h_s) et se distinguent par l'opérateur de *transfert* (routage / voie lente / cascade).

Schéma	Noyau commun (présent dans tous)	États / réservoirs spécifiques	Sortie(s) visée(s)	Ajouts (vs précédent) : paramètres / rôle
A	Production SCS continue : $h_a \in [0, I_a]$ (abstraction), $h_s \in [0, S]$ (stock sol), infiltration contrôlée par l'état (h_s/S), vidange interne effective (seepage)	Stock de surface	Cloutasse : Q CSR : Q_{ruiss}	Base : paramètres de production (I_a, S) et paramètres internes. Pas de paramètre de transfert (production \approx transfert).
B	Même noyau SCS (A)	Ajout routage de surface: un réservoir linéaire h_r tel que $r_{\text{out}} = k_{\text{runoff}} h_r$	Cloutasse : Q CSR : Q_{ruiss}	Ajout vs A : $k_{\text{runoff}} (\text{s}^{-1})$: impose une échelle de temps (lissage, retard) sans changer la production volumique.
C	Même noyau SCS (A) + routage (B)	Ajout voie lente explicitement routée : un compartiment h_{sub} alimenté par une fraction de l'infiltration, avec $q_{\text{sub}} = k_{\text{sub}} h_{\text{sub}}$; débit total $Q_{\text{mod}} \propto r_{\text{out}} + q_{\text{sub}}$	Cloutasse : Q (séparation rapide/lent)	Ajout vs B : $\alpha_{\text{sub}} \in [0, 1]$: fraction de l'infiltration dirigée vers la voie lente $k_{\text{sub}} (\text{s}^{-1})$: temps caractéristique de la composante lente <i>But</i> : reproduire queues de décrue / double échelle de temps.
D (CSR)	Même noyau SCS (A) ; calibration exploitant aussi Q_{inf} comme contrainte interne	Cascade de routage rapide : deux réservoirs en série $h_{r1} \rightarrow h_{r2}$, avec $r_{1,\text{out}} = k_{\text{runoff1}} h_{r1}$, $r_{2,\text{out}} = k_{\text{runoff2}} h_{r2}$	CSR : Q_{ruiss} et Q_{inf} (contrainte interne)	Ajout vs B (branche CSR) : $k_{\text{runoff1}}, k_{\text{runoff2}} (\text{s}^{-1})$: deux temps caractéristiques (pic + queue)

A.2 Résultat Cloutasse

Table A.2 – Cloutasse – Constantes de vidange issues des décrues (synthèse à deux échelles)

Échelle	N	$k (\text{s}^{-1})$	$t_{1/2} (\text{h})$
Rapide (segments à 2 régimes)	3	$[6.3 \times 10^{-5}; 7.0 \times 10^{-4}]$	$[3.1; 0.28]$
Lente (régime dominant, 1 régime)	182	$[1.9 \times 10^{-7}; 3.3 \times 10^{-4}]$	$[1000; 0.6]$

A.3 Résultat CSR

Table A.3 – CSR – Constantes de vidange estimées sur décrues

Signal	Constante	N	$k_{\min} (\text{s}^{-1})$	$k_{\text{med}} (\text{s}^{-1})$	$k_{\max} (\text{s}^{-1})$	$t_{1/2} : \text{min} / \text{med} / \text{max}$
Q_{ruiss}	k_{runoff}	51	8.26×10^{-4}	2.11×10^{-3}	4.02×10^{-3}	14.0 / 5.5 / 2.9 min
Q_{inf}	k_{seepage}	272	1.30×10^{-5}	6.50×10^{-5}	8.32×10^{-4}	14.8 / 3.0 / 0.23 h

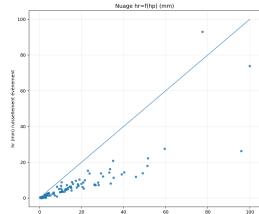


Figure A.1 – CSR : relation évènementielle $h_r = f(h_p)$

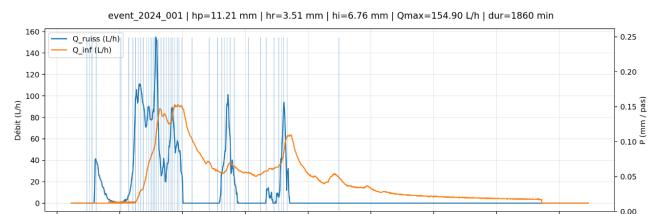


Figure A.2 – Exemple d'évènement découpé

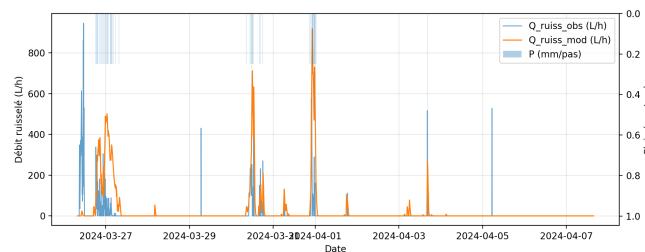


Figure A.3 – modèle C sur CSR

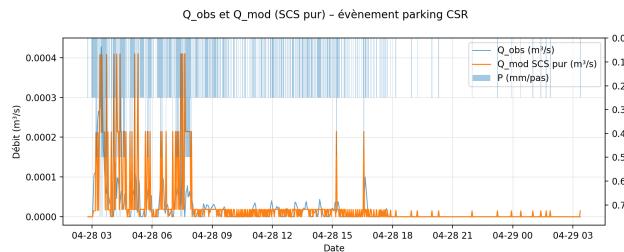


Figure A.4 – CSR : schéma A

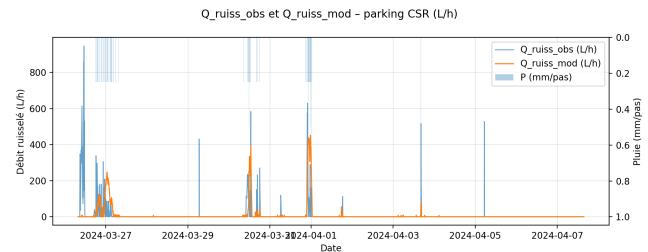


Figure A.5 – CSR : schéma B

A.4 Calibration finale

Table A.4 – Comparaison des paramètres hydrologiques issus du calage continu en validation croisée (CSR, année hydrologique 2022–2023). Les paramètres sont exprimés sous forme de constantes de vidange temporelles ($t_{1/2} = \ln(2)/k$).

Paramètre	H1 → H2	H2 → H1
Infiltration k_{infiltr} (mm/h)	4.88	1.65
Seepage $t_{1/2,\text{seep}}$ (h)	4.00	4.00
Ruisseaulement rapide $t_{1/2,\text{r1}}$ (min)	2.50	2.50
Ruisseaulement lent $t_{1/2,\text{r2}}$ (min)	5.01	20.05

Bibliography

- Keith Beven. *Rainfall-Runoff Modelling: The Primer*. Wiley-Blackwell, 3rd edition, 2021.
- R. H. Hawkins. Runoff curve numbers with varying site moisture. *Journal of Irrigation and Drainage Division*, 101(IR1):25–37, 1975.
- A. Krajewski, K. Banasik, and T. Okruszko. Seasonal variability of initial abstraction ratio in the scs-cn method. *Hydrology Research*, 53(5):653–669, 2022.
- S. K. Mishra and V. P. Singh. Another look at scs-cn method. *Journal of Hydrologic Engineering*, 4(3):257–264, 1999.
- V. Mockus. Hydrology. Technical Report National Engineering Handbook, Section 4, USDA Soil Conservation Service, 1956.
- V. M. Ponce and R. H. Hawkins. Runoff curve number: Why the scs method works and why it has problems. *Journal of Soil and Water Conservation*, 44:29–34, 1989.
- V. M. Ponce and R. H. Hawkins. Runoff curve number: Has it reached maturity? *Journal of Hydrologic Engineering*, 1(1):11–19, 1996.
- K. X. Soulis and J. D. Valiantzas. Scs-cn method with green-ampt infiltration. *Water Resources Management*, 25: 2107–2120, 2011.
- USDA-NRCS. National engineering handbook. part 630 – hydrology. Technical report, United States Department of Agriculture, 2004.