



NOTICE TECHNIQUE : page 1

TECHNICAL MANUAL : page 13

Léa Sandron, Daniel Szelényi, Santiago Sandoval,
Edgar Villarreal, Jean-Luc Bertrand-Krajewski

Version 2020 04 15

Table des matières

Introduction	2
Le système et ses éléments	2
Notations	4
Surfaces imperméables	6
1. Fonctionnement du modèle	6
2. Equation de l'écoulement	6
Surfaces perméables	6
1. Fonctionnement du modèle	6
2. Equations de l'infiltration	6
Unités de stockage	7
1. Fonctionnement du modèle	7
2. Equations du modèle	7
a. Stockage	7
b. Infiltration	7
c. Débit de régulation et surverse	7
Toitures	8
1. Fonctionnement du modèle	8
2. Equations du modèle	9
a. Capacité de stockage maximale du réservoir substrat	9
b. Capacité de stockage du réservoir alvéolaire	9
c. Évapotranspiration de la toiture végétalisée	9
d. Flux d'évapotranspiration des alvéoles vers le substrat	9
e. Flux d'évapotranspiration du substrat vers l'atmosphère	9
f. Flux d'infiltration du substrat vers le réservoir alvéolaire	10
g. Stock des réservoirs et débordement du réservoir alvéolaire	10
Connexion entre les unités	11
1. Fonctionnement des connexions	11
2. Equation d'écoulement	11
Références bibliographiques	12

Introduction

URBIS est un outil de simulation numérique des techniques alternatives de gestion à la source des eaux pluviales en milieu urbain. Ses bases générales sont les théories de l'hydrologie et de l'hydraulique.

URBIS utilise la méthode des différences finies. Il effectue des itérations sur un pas de temps fixe pour calculer et suivre l'évolution des variables d'un système à partir d'un ensemble de données initiales. Il modélise les phénomènes hydrologiques (infiltration, écoulement, etc.) par des équations conceptuelles.

URBIS permet de simuler des systèmes perméables, tels que des toitures végétalisées ou des surfaces poreuses. Ces systèmes permettent de gérer et valoriser les eaux pluviales par rétention, évapotranspiration et infiltration. Le présent document décrit les principes de modélisation d'URBIS, ainsi que les principales équations implémentées dans le logiciel.

Le système et ses éléments

URBIS propose un environnement dans lequel plusieurs éléments techniques (bassins, toitures, parkings poreux) peuvent être combinés au sein d'un système. Selon le choix des éléments du système, celui-ci traitera les données d'entrée pour obtenir les résultats simulés (voir Figure 1).

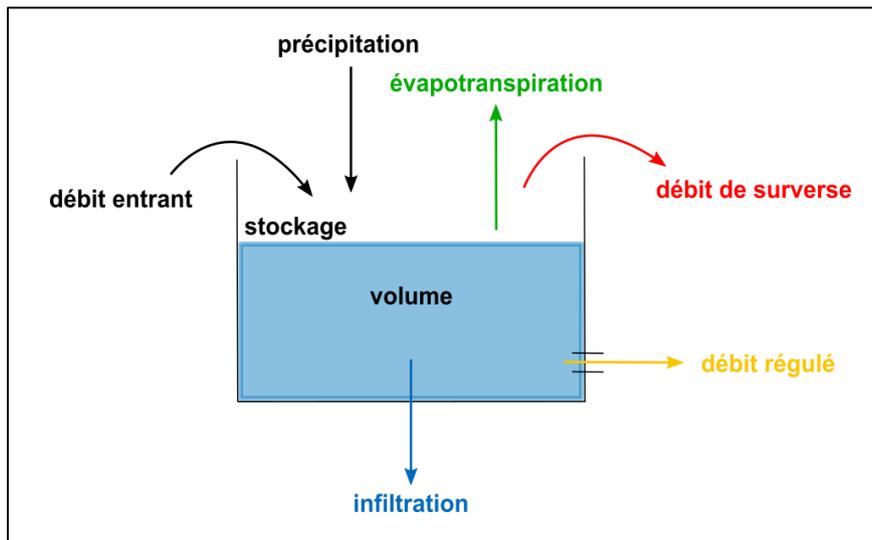


Figure 1 : Logique de fonctionnement

Les **données d'entrée hydrologiques** du système sont les suivantes :

- L'intensité de la précipitation
- L'évapotranspiration potentielle.

Les **résultats (sorties)** du système sont les suivants :

- Le volume d'eau évacué à débit régulé
- Le volume d'eau évacué par surverse
- Le volume d'eau évacué par évapotranspiration réelle
- Le volume d'eau évacué par infiltration
- Le volume d'eau stocké dans le système.

La performance du système mise en avant par URBIS est l'**abattement**, c'est-à-dire la fraction du volume d'eau précipitée qui n'est pas transférée au système d'assainissement urbain aval. L'abattement quantifie l'efficacité du système à gérer l'eau de pluie à la source pendant la durée de la simulation :

$$\mathbf{abattement} = \frac{\mathit{volume\ infiltré} + \mathit{volume\ évaporé} + \mathit{volume\ stocké}}{\mathit{volume\ d'entrée\ total}} (\%)$$

Les valeurs par défaut des paramètres des toitures végétalisées sont repris d'une étude du CEREMA (Payet, 2019). Ces valeurs peuvent être modifiées par l'utilisateur pour s'adapter à chaque projet de simulation.

Dans les paragraphes suivants sont décrits les différents éléments techniques simulés par URBIS. Ils sont présentés par ordre de complexité croissante, des surfaces imperméables classiques jusqu'aux toitures végétalisées, en ajoutant une fonction à chaque étape. Par conséquent, chaque élément présenté est muni de toutes les fonctions des éléments précédents comme indiqué dans le Tableau 1.

	Ruissellement	Infiltration	Stockage	Evapotranspiration
Surfaces imperméables	X			
Surfaces poreuses	X	X		
Unités de stockage	X	X	X	
Toitures	X	X	X	X

Tableau 1 : Les éléments et leurs fonctions

Notations

C_{ALV}	capacité maximale de stockage du réservoir alvéolaire de la toiture végétalisée (mm)
C_{SUBS}	capacité maximale de stockage du substrat de la toiture végétalisée (mm)
CME	capacité au champ du substrat (%)
E_p	épaisseur du substrat (mm)
ETP	évapotranspiration potentielle (mm/h)
ETP_{ttv}	évapotranspiration potentielle de la toiture végétalisée (mm/h)
ETR_{ALV}	évapotranspiration du réservoir alvéolaire de la toiture végétalisée (mm/h)
ETR_{SUBS}	évapotranspiration du substrat et de la végétation (mm/h)
$f(t)$	capacité d'infiltration (mm/h)
F_p	infiltration cumulée (mm)
h_{ALV}	hauteur d'eau dans les alvéoles (mm)
H_{ALV}	hauteur des alvéoles (mm)
h_{final}	hauteur d'eau dans l'ouvrage (mm)
h_{SUBS}	hauteur d'eau stockée dans le substrat de la toiture végétalisée (mm)
I	flux d'infiltration entre le substrat et le réservoir alvéolaire (mm/h)
i	pente hydraulique de la conduite (m/m)
I_p	intensité de la pluie (mm/h)
K_{ALV}	coefficient de vidange du réservoir alvéolaire par le flux d'évapotranspiration (-)
$K_{h,sat}$	conductivité hydraulique à l'état saturé (mm/h)
K_s	coefficient de Manning-Strickler ($m^{1/3}/s$)
K_{saison}	coefficient de correction variant entre 0.1 et 1 suivant la saison (-)
l	longueur de la conduite (m)
P	précipitation (mm)
$Q_{écoulement}$	débit d'écoulement en surface (L/s)
$Q_{entrant}$	débit entrant sur la surface (L/s)
$Q_{entrée}$	débit d'entrée dans l'unité de stockage (L/s)

Q_{sortie}	débit de sortie de l'unité de stockage (L/s)
$R(t)$	ruissellement en surface (mm/h)
R_h	rayon hydraulique de la conduite (m)
$S_{ouvrage}$	surface de l'ouvrage (m ²)
S_{projet}	surface totale aménagée (m ²)
t	temps de retard d'un élément à l'autre (s)
Δt	pas de temps de la simulation (s)
t_p	temps nécessaire pour que le sol soit saturé (s)
$Vide$	indice des vides (-)
V	vitesse moyenne dans la section transversale (m/s)
$V_{stock,final}$	volume d'eau stocké à la fin de l'itération (L)
$V_{stock,initial}$	volume d'eau stocké avant l'itération (L)
$V_{surverse}$	volume d'eau évacué par surverse (L)
ψ	potentiel matriciel au niveau du front d'humectation (mm)
θ_i	quantité d'eau initiale dans la structure (-)
θ_s	quantité d'eau quand la structure est saturée (-)
$\Delta\theta$	différence de quantité d'eau entre l'état initial et la saturation (-)
θ_r	point de flétrissement du substrat de la toiture végétalisée (%)
Φ	porosité de la structure (-)

Surfaces imperméables

1. Fonctionnement du modèle

Les surfaces imperméables sont les surfaces construites permettant uniquement l'écoulement de l'eau sans infiltration. Le débit d'écoulement correspond au débit entrant, en faisant l'hypothèse que les surfaces sont suffisamment petites pour négliger l'atténuation et le retard du débit ruisselé.

2. Equation de l'écoulement

$$Q_{\text{écoulement}} = Q_{\text{entrant}} = \frac{I_p \times S_{\text{ouvrage}}}{3600} \quad \text{Eq. 1}$$

Surfaces perméables

1. Fonctionnement du modèle

Les surfaces poreuses introduisent la première fonction fondamentale : l'infiltration. Ces surfaces sont conçues pour infiltrer l'eau de pluie vers le sol ou vers un bassin de stockage. Le phénomène d'infiltration est modélisé par l'équation de Green-Ampt, un modèle physique simplifié.

2. Equations de l'infiltration

Dans un premier temps, il est nécessaire de calculer l'infiltration cumulée, c'est-à-dire, la quantité d'eau qui s'infiltré avant saturation du sol :

$$F_p = K_{h,sat} \times \psi \times \frac{(\theta_s - \theta_i)}{(I_p - K_{h,sat})} \quad \text{Eq. 2}$$

Dans un second temps on effectue le calcul de la capacité d'infiltration :

$$f(t) = K_s \times \left(\frac{\psi \times \Delta \theta}{F_p} + 1 \right) \quad \text{Eq. 3}$$

Le ruissellement en surface existe uniquement quand l'intensité de la précipitation est supérieure à la capacité d'infiltration :

$$R(t) = \min(0 ; I_p(t) - f(t)) \quad \text{Eq. 4}$$

Unités de stockage

1. Fonctionnement du modèle

Les unités de stockage sont modélisées sous trois formes : **bassin ouvert**, **bassin enterré** ou **noeu**. Ces trois options utilisent les mêmes fonctions, mais de manières différentes. On introduit ici la fonction de stockage de l'eau, qui se caractérise par la hauteur d'eau h dans l'ouvrage.

Les fonctions implémentées dans les unités de stockage sont : stockage, infiltration, débit de surverse et débit régulé.

2. Equations du modèle

a. Stockage

La quantité d'eau stockée dans le système est évaluée par une opération simple de bilan de masse, en calculant les volumes d'entrée et de sortie :

$$V_{stock,final} = V_{stock,initial} + Q_{entrée} * \Delta t - Q_{sortie} * \Delta t \quad \text{Eq. 5}$$

$$h_{final} = \Phi * V_{stock,final} / S_{ouvrage} \quad \text{Eq. 6}$$

Les dimensions de l'ouvrage (surface, profondeur) ainsi que les débits d'entrée et de sortie peuvent être fixés par l'utilisateur, le pas de temps est fixe et la variable calculée en sortie est h .

b. Infiltration

De même que pour les surfaces perméables, le débit d'infiltration vers le sol est calculé grâce au modèle de Green-Ampt.

c. Débit de régulation et surverse

Le débit régulé et la surverse correspondent à des fonctionnements similaires, mais ont un rôle différent. La régulation permet d'évacuer de l'ouvrage un débit constant, fixé par l'utilisateur, tandis que la surverse impose une hauteur d'eau maximale dans l'ouvrage, évacuant toute la quantité d'eau nécessaire pour la maintenir à cette valeur maximale.

Le stockage maximum de chacune des techniques est réglable par l'utilisateur (il est également possible de ne pas l'activer).

Toitures

Le modèle de toiture présente toutes les fonctions décrites précédemment : ruissellement, infiltration, stockage et débit de vidange régulé. La fonctionnalité supplémentaire propre à cette technique est l'évapotranspiration. URBIS permet à l'utilisateur de choisir entre une toiture imperméable et différents types de toitures végétalisées. Les toitures imperméables se comportent comme les surfaces imperméables, seul le ruissellement est autorisé.

1. Fonctionnement du modèle

Les toitures végétalisées sont composées de deux réservoirs représentant leurs deux fonctions principales (voir Figure 2) :

- Le substrat est le premier réservoir qui retient une partie de la pluie. Il est caractérisé par une capacité de stockage C_{SUBS} . La hauteur d'eau dans le substrat h_{SUBS} varie au cours du temps en fonction des entrées et des sorties. Les entrées sont la pluie et la remontée du réservoir alvéolaire ETR_{ALV} pour permettre l'évapotranspiration depuis le substrat. Les sorties sont l'évapotranspiration depuis le substrat ETR_{SUBS} et l'infiltration I depuis le substrat vers le réservoir alvéolaire sous-jacent lorsque la quantité d'eau stockée dans le substrat dépasse la capacité au champ.
- Le réservoir alvéolaire est le deuxième réservoir qui stocke l'eau qui s'infiltrate à travers le substrat situé au-dessus. Il est caractérisé par une capacité de stockage C_{ALV} . La hauteur d'eau dans le réservoir alvéolaire h_{ALV} varie au cours du temps. La vidange du réservoir alvéolaire se fait par remontée d'eau pour permettre l'évapotranspiration depuis le substrat et par surverse éventuelle vers l'évacuation d'eaux pluviales dès que le stock dépasse la capacité de stockage du réservoir.

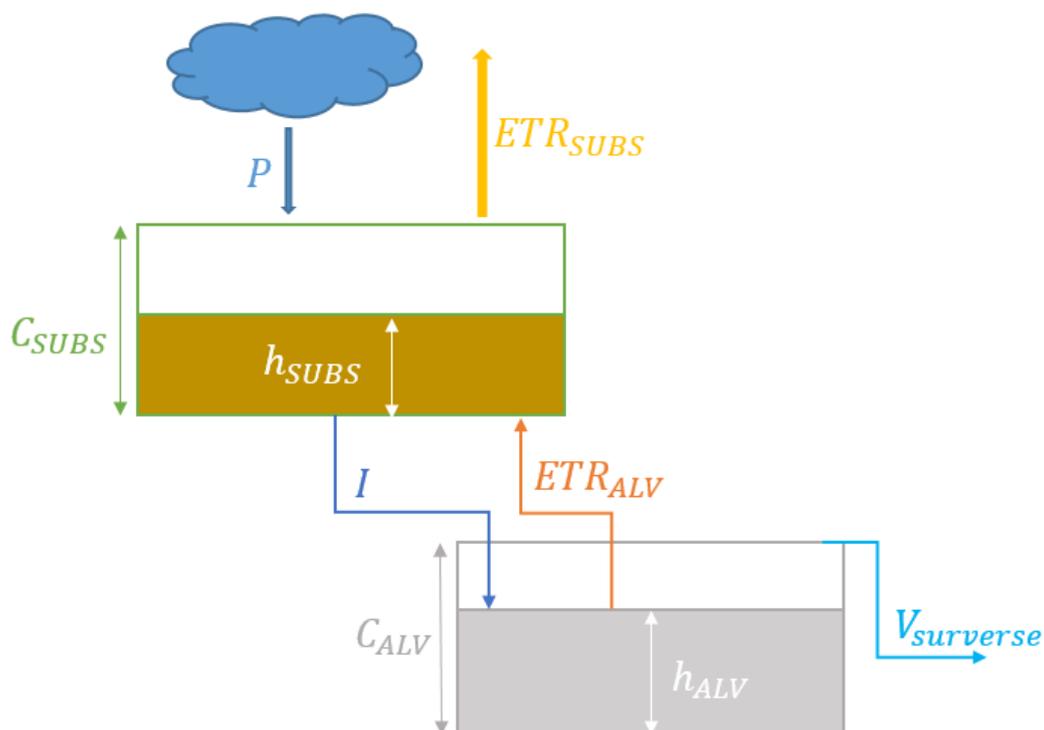


Figure 2 : Schéma de fonctionnement des toitures

2. Equations du modèle

a. Capacité de stockage maximale du réservoir substrat

La capacité de stockage maximale du substrat dépend des caractéristiques propres du substrat et de l'épaisseur mise en œuvre.

$$C_{SUBS} = E_p \times (CME - \theta_r)/100 \quad \text{Eq. 7}$$

b. Capacité de stockage du réservoir alvéolaire

La capacité de stockage maximale du réservoir alvéolaire dépend des caractéristiques de la structure alvéolaire mise en œuvre.

$$C_{ALV} = H_{ALV} \times Vide \quad \text{Eq. 8}$$

c. Évapotranspiration de la toiture végétalisée

L'évapotranspiration de la toiture végétalisée est calculée à partir des données d'évapotranspiration potentielle. Le coefficient K_{saison} permet de moduler l'évapotranspiration potentielle suivant les périodes.

$$ETP_{ttv} = K_{saison} \times ETP \quad \text{Eq. 9}$$

D'après Payet (2019) les valeurs optimums de K_{saison} retenus sont $K_{hiver} = 0.5$ et $K_{été} = 1$.

À partir de cette équation, les flux d'évapotranspiration des deux réservoirs substrat et alvéolaire peuvent être déterminés.

d. Flux d'évapotranspiration des alvéoles vers le substrat

Le flux d'évapotranspiration dépend de la hauteur d'eau dans les alvéoles. Le coefficient K_{ALV} permet de moduler l'évapotranspiration réelle suivant la hauteur d'eau dans les alvéoles.

$$ETR_{ALV} = \min(K_{ALV} \times ETP_{TTV}, h_{ALV} \times \frac{3600}{\Delta t}) \quad \text{Eq. 10}$$

$$K_{ALV} = \left(\frac{h_{ALV}}{C_{ALV}}\right)^\alpha \quad \text{Eq. 11}$$

D'après Payet (2019), la valeur α optimum retenue est $\alpha = 1$. Cette valeur est valable pour le cas particulier de la France, mais elle doit être adaptée si la simulation a lieu pour un climat différent.

e. Flux d'évapotranspiration du substrat vers l'atmosphère

On fait l'hypothèse que la teneur en eau du substrat est à sa capacité maximale tant que de l'eau est disponible dans les alvéoles et commence à diminuer quand les alvéoles sont vides. Cela se traduit dans les équations par les deux cas suivants :

$$h_{ALV} > 0; ETR_{SUBS} = ETR_{ALV} \quad \text{Eq. 12}$$

$$h_{ALV} = 0; ETR_{SUBS} = \min(ETP_{ttv}, h_{SUBS} \times \frac{3600}{\Delta t}) \quad \text{Eq. 13}$$

f. Flux d'infiltration du substrat vers le réservoir alvéolaire

Si les arrivées d'eau dans le substrat conduisent à dépasser la capacité maximale C_{SUBS} , alors l'excédent d'eau rejoint directement le réservoir alvéolaire, selon l'équation suivante :

$$I = \max \left(h_{SUBS} \times \frac{3600}{\Delta t} + I_p - ETR_{SUBS} + ETR_{ALV} - C_{SUBS} \times \frac{3600}{\Delta t}, 0 \right) \quad \text{Eq. 14}$$

g. Stock des réservoirs et débordement du réservoir alvéolaire

Après la détermination des flux d'évapotranspiration du substrat et du réservoir alvéolaire et la détermination du flux d'infiltration vers le réservoir alvéolaire, une étape de mise à jour des hauteurs d'eau dans les deux réservoirs est indispensable. De plus, lorsque la quantité d'eau du réservoir alvéolaire dépasse sa capacité de stockage, l'excédent est évacué par les descentes d'eaux pluviales de la toiture.

$$h_{SUBS_{i+1}} = \min \left(h_{SUBS_i} + I_p \times \frac{\Delta t}{3600} - (ETR_{SUBS_i} + ETR_{ALV_i} - I_i) \times \frac{\Delta t}{3600}, C_{SUBS} \right) \quad \text{Eq. 15}$$

$$V_{surverse} = \max \left([h_{ALV} - (ETR_{ALV} + I) \times \frac{\Delta t}{3600} - C_{ALV}] \times S_{ouvrage}, 0 \right) \quad \text{Eq. 16}$$

$$h_{ALV_{i+1}} = \min \left(h_{ALV_i} - (ETR_{ALV_i} + I_i) \times \frac{\Delta t}{3600}, C_{ALV} \right) \quad \text{Eq. 17}$$

Les évacuations d'eaux pluviales peuvent être de deux types : soit à débit régulé, soit par surverse.

Connexion entre les unités

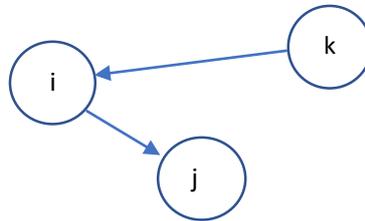
1. Fonctionnement des connexions

Afin de créer un système de gestion des eaux pluviales associant plusieurs techniques de contrôle à la source, le logiciel permet de créer des connexions entre les unités présentées dans les paragraphes précédents. L'utilisateur détermine la direction des transferts des eaux pluviales entre unités. Les débits transférés peuvent être de trois types : débit de régulation, débit de surverse et débit d'infiltration.

Les connexions entre éléments du système de gestion des eaux pluviales sont enregistrées dans une matrice de connexion globale, dans laquelle chaque élément correspond à une ligne et une colonne. Chaque élément de la matrice peut prendre trois valeurs, exprimant une relation entre deux éléments du système :

- 1 : l'élément en ligne transfère un débit vers l'élément en colonne
- -1 : l'élément en ligne reçoit un débit en provenance de l'élément en colonne
- 0 : absence de connexion entre les deux éléments.

Ci-dessous un exemple de système à 3 éléments avec la matrice correspondante :



$$\begin{array}{c} i \quad j \quad k \\ i \quad \begin{pmatrix} 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \\ j \\ k \end{array}$$

Avec cette méthode matricielle, toutes les données de connexion du système sont enregistrées de manière simple et efficace, facilitant l'usage des données dans le calcul.

2. Equation d'écoulement

Un temps de transfert entre éléments du système pour l'écoulement en conduite doit être estimé par l'utilisateur. Le logiciel propose un calcul utilisant quatre paramètres de la conduite : diamètre, longueur, pente et rugosité correspondant à son matériau.

La vitesse moyenne d'écoulement dans la conduite est calculée avec l'équation de Manning-Strickler :

$$V = K_s * R_h^{\frac{2}{3}} * i^{\frac{1}{2}} \quad \text{Eq. 18}$$

Puis le temps de transfert est calculé en fonction de la distance séparant les deux éléments :

$$t = \frac{l}{V} \quad \text{Eq. 19}$$

Références bibliographiques

Rawls W.J., Brakensiek D.L., Miller N. (1983). Green-Ampt infiltration parameters from soils data. *Journal of Hydraulic Engineering*, 109(1), [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1983\)109:1\(62\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1983)109:1(62)).

Payet C. (2019). Action – Recherche du Cerema : évaluation d'une toiture terrasse végétalisée à zéro rejet. Cerema Île-de-France, Livrable n°3 : rapport final.

Sandoval S., Filippi R., Houssin E., Beauvisage L., Bournique R., Bertrand-Krajewski J.-L. (2019). A simulation tool for comparing the hydrological performance of various associated stormwater source-control techniques at the scale of buildings and blocks. *Proceedings of Novatech 2019*, Lyon, France, 01-05 July, 4 p.

Table of contents

Introduction	14
The system and its elements	14
Notations	16
Impervious surfaces	18
1. Model description	18
2. Flow equation:	18
Permeable surfaces	18
1. Model description	18
2. Equations for infiltration	18
Storage units	19
1. Model description	19
2. Equations of the model	19
a. Storage	19
b. Infiltration	19
c. Regulated outflow and overflow	19
Roofs	20
1. Description of the model	20
2. Equations of the model	21
a. Maximum storage capacity of the substrate reservoir	21
b. Storage capacity of the alveolus structure	21
c. Green roof evapotranspiration	21
d. Evapotranspiration from alveolus reservoir to substrate	21
e. Evapotranspiration from the substrate to the atmosphere	21
f. Infiltration from the substrate into the alveolus reservoir	22
g. Reservoirs storage and overflow of the alveolus reservoir	22
Connection of the elements	23
1. Connexions description	23
2. Flow equation	23
References	24

Introduction

URBIS is a numerical simulation tool for the analysis of source control techniques for urban stormwater management. It is based on the basic concepts of hydrology and hydraulics.

URBIS solves equations by means of the finite differences method. It carries out iterations on a fixed time step in order to compute and follow the evolution of a system quantities based on a set of initial values. The software models hydrologic phenomena (infiltration, surface flow, etc.) by means of conceptual equations.

URBIS is able to simulate stormwater source control techniques, including permeable systems such as e.g. vegetated roofs or permeable surfaces. These systems offer the possibility to manage and valorise stormwater by retention, evapotranspiration and infiltration. The present document describes the modelling principles of URBIS, alongside with the main equations implemented in the software.

The system and its elements

URBIS proposes an environment in which several source control techniques (tanks, roofs, permeable parking surfaces, etc.) can be combined in the same system. According to the choice of elements, the system treats entry data in order to obtain simulated results (see Figure 3).

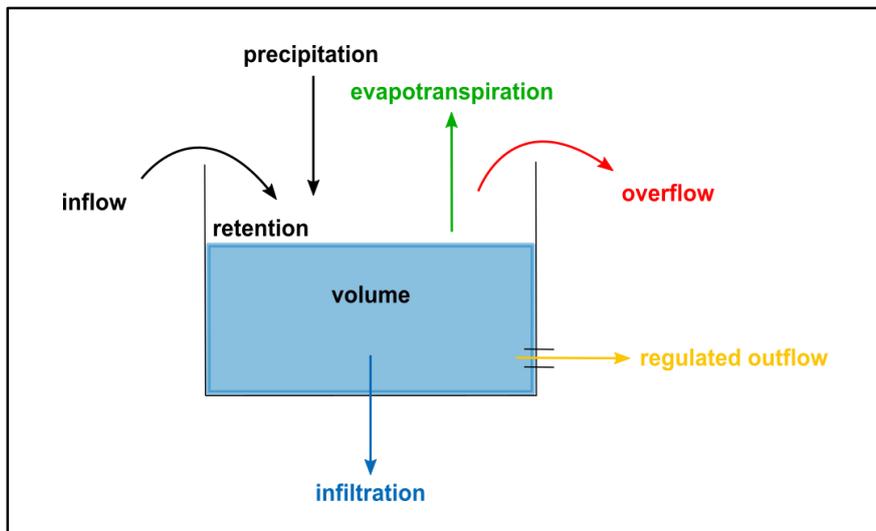


Figure 3: Scheme of the simulation process

The **input hydrological data** of the system are the following ones:

- Precipitation intensity
- Potential evapotranspiration.

The **results (output data)** of the system are the following ones:

- Water volume discharged by regulated outflow
- Water volume discharged by overflow
- Water volume removed by real evapotranspiration
- Water volume removed by infiltration
- Water volume stored in the system.

The performance of the system URBIS emphasises is the total **retention**, designating the fraction of precipitation water that is not transferred to the downstream urban drainage system. The total retention quantifies the performance of the system in managing rainwater at the source, over the time of the simulation:

$$\mathbf{retention} = \frac{\mathit{infiltrated\ volume} + \mathit{evaporated\ volume} + \mathit{stored\ volume}}{\mathit{total\ entry\ volume}} (\%)$$

For vegetated roofs parameters, default values have been taken from a previous research by CEREMA (Payet, 2019). URBIS allows the user to use specific local values for a given simulation project.

In the following paragraphs the different technical elements simulated by URBIS are described. They are presented in an order of increasing complexity, from classic impervious surfaces to vegetated roofs, adding a new functionality at each step. In consequence, each presented element is provided with all the functionalities of preceding elements, as indicated in Table 1.

	Surface flow	Infiltration	Storage	Evapotranspiration
Impervious surfaces	X			
Permeable surfaces	X	X		
Storage units	X	X	X	
Roofs	X	X	X	X

Table 1: The URBIS elements and their functions

Notations

C_{ALV}	storage capacity of the alveolus structure of a green roof (mm)
C_{SUBS}	substrate storage capacity of a green roof (mm)
CME	maximal water capacity of the substrate (%)
E_p	substrate thickness (mm)
ETP	potential evapotranspiration (mm/h)
ETP_{ttv}	potential green roof evapotranspiration (mm/h)
ETR_{ALV}	green roof alveolus reservoir evapotranspiration (mm/h)
ETR_{SUBS}	vegetation and substrate evapotranspiration (mm/h)
$f(t)$	infiltration capacity (mm/h)
F_p	cumulated infiltration (mm)
h_{ALV}	water level in the alveolus structure (mm)
H_{ALV}	alveolus structure height (mm)
h_{final}	water level in the basin (mm)
h_{SUBS}	water level in the substrate of a green roof (mm)
I	infiltration flow between substrate reservoir and alveolus reservoir (mm/h)
i	slope of the pipe (m/m)
I_p	rainfall intensity (mm/h)
K_{ALV}	emptying coefficient of the reservoir by evapotranspiration flux (-)
$K_{h,sat}$	hydraulic conductivity at saturation (mm/h)
K_s	Manning-Strickler coefficient ($m^{1/3}/s$)
K_{saison}	correction coefficient between 0.1 and 1 depending on the season (-)
l	pipe length (m)
P	precipitation (mm)
Q_{flow}	surface flow rate (L/s)
Q_{input}	flow rate entering the surface (L/s)
Q_{inflow}	inflow rate into the storage unit (L/s)

$Q_{outflow}$	outflow rate from the storage unit (L/s)
$R(t)$	surface runoff (mm/h)
R_h	pipe hydraulic radius (m)
$S_{facility}$	surface of the facility (m ²)
$S_{project}$	total project surface (m ²)
t	lag time from one element to the other (s)
Δt	simulation time step (s)
t_p	time necessary for soil saturation (s)
$Void$	void ratio (-)
V	cross-sectional average velocity (m/s)
$V_{overflow}$	volume of water evacuated by overflow (L)
$V_{stock,final}$	volume of water stored at the end of the iteration (L)
$V_{stock,initial}$	volume of water stored at the beginning of the iteration (L)
ψ	wetting front soil suction head (mm)
θ_i	initial water quantity in the structure (-)
θ_s	water quantity when the structure is saturated (-)
$\Delta\theta$	difference of water quantity between initial state and saturation (-)
θ_r	wilting point of the substrate of a green roof (%)
Φ	structure porosity (-)

Impervious surfaces

1. Model description

Impervious surfaces are constructed surfaces such as parking lots or sidewalks, allowing only stormwater runoff without infiltration. The output flow rate is equal to the input flow rate, with the assumption that the surfaces are small enough to neglect the attenuation and delay of the surface flow rate.

2. Flow equation:

$$Q_{flow} = Q_{enter} = \frac{I_p \times S_{facility}}{3600} \quad \text{eq. 1}$$

Permeable surfaces

1. Model description

With porous surfaces the first fundamental functionality is introduced: infiltration. These surfaces are designed to infiltrate rainwater towards the ground or a storage basin. The phenomenon of infiltration is modelled by the Green-Ampt equation, a simple physical model.

2. Equations for infiltration

First, it is necessary to calculate the cumulated infiltration, meaning the quantity of water infiltrated before saturation of the soil.

$$F_p = K_{h,sat} \times \psi \times \frac{(\theta_s - \theta_i)}{(I_p - K_{h,sat})} \quad \text{eq. 2}$$

Second, we calculate the infiltration capacity:

$$f(t) = K_{h,sat} \times \left(\frac{\psi \times \Delta\theta}{F_p} + 1 \right) \quad \text{eq. 3}$$

The surface flow occurs only when the rainfall intensity is superior to the infiltration capacity or when the soil is completely saturated:

$$R(t) = \min(0 ; I_p(t) - f(t)) \quad \text{eq. 4}$$

Storage units

1. Model description

Storage units are modelled under three forms: **open basins**, **underground basins** or **swales**. These three options use the same functionalities, but in different ways. Here we introduce the functionality of water storage, which is characterised by the water level h in the structure.

The functions implemented for storage units are the following ones: retention, infiltration, overflow and regulated flow.

2. Equations of the model

a. Storage

The quantity of water stored in the facility is evaluated by means of a simple mass balance, calculating the input and output volumes:

$$V_{stock,final} = V_{stock,initial} + Q_{inflow} * \Delta t - Q_{outflow} * \Delta t \quad \text{eq.5}$$

$$h_{final} = \Phi * V_{stock,final} / S_{facility} \quad \text{eq.6}$$

The dimensions of the technical elements (surface, depth) along with the input and output flow rates can be defined by the user, the time step is set constant and the output quantity is h .

b. Infiltration

As well as for the permeable surfaces, the infiltration flow into the soil is calculated by means of the Green-Ampt model.

c. Regulated outflow and overflow

The regulated outflow and the overflow work in similar ways, but have a different role. Regulation allows to evacuate a constant flow from the structure, set by the user, whereas the overflow imposes a maximum water level in the facility, evacuating all the excess water to respect the maximum water level.

The maximum storage level of each structure is set by the user (it is also possible not to activate it).

Roofs

The roofs model includes all functions described above: surface runoff, infiltration, storage and regulated outflow. The additional functionality for roofs is evapotranspiration. URBIS allows the user to choose between impervious roofs or different types of green roofs. Impervious roofs behave as impervious surfaces, allowing only stormwater runoff.

1. Description of the model

Green roofs are composed of two reservoirs which represent their two main functions each (see Figure 4):

- The substrate is the first reservoir that intercepts a part of the rainfall. It is characterised by its storage capacity C_{SUBS} . The water level in the substrate h_{SUBS} varies over time depending on inflows and outflows. The inflows are rainfall and the up-flow from the alveolus reservoir ETR_{ALV} to allow evapotranspiration from the substrate. The outflows are the evapotranspiration from substrate ETR_{SUBS} and the infiltration I from the substrate into the underlying alveolus reservoir when the water stored in the substrate exceeds the field capacity.
- The alveolus reservoir is the second reservoir which stores the water which infiltrates from the above substrate. It is characterised by its storage capacity C_{ALV} . The water level in the alveolus reservoir h_{ALV} varies over time. The alveolus reservoir is emptied by up-flow from the alveolus reservoir ETR_{ALV} to allow evapotranspiration from the substrate and by possible overflow if the stored volume exceeds the storage capacity of the reservoir.

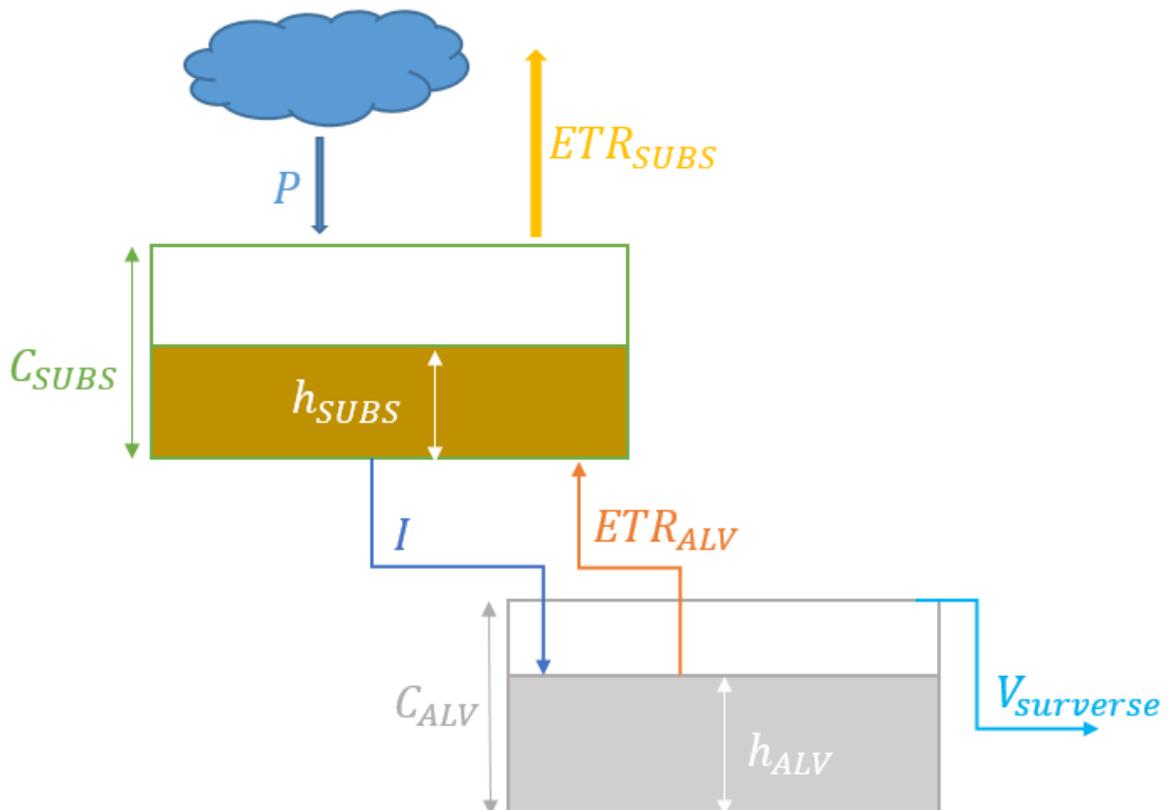


Figure 4: Scheme of the roofs model

2. Equations of the model

a. Maximum storage capacity of the substrate reservoir

The substrate maximum storage capacity depends on the substrate characteristics and its thickness.

$$C_{SUBS} = E_p \times (CME - \theta_r) / 100 \quad \text{eq.7}$$

b. Storage capacity of the alveolus structure

The alveolus reservoir maximum storage capacity depends on the alveolus structure characteristics.

$$C_{ALV} = H_{ALV} \times Void \quad \text{eq.8}$$

c. Green roof evapotranspiration

The green roof evapotranspiration is calculated from potential evapotranspiration data. The coefficient K_{saison} allows to modulate the potential evapotranspiration depending on seasons.

$$ETP_{ttv} = K_{saison} \times ETP \quad \text{eq.9}$$

According to Payet (2019), the optimum values for K_{saison} are: $K_{winter} = 0.5$ et $K_{summer} = 1$.

With this equation the evapotranspiration from both substrate and alveolus reservoirs can be determined.

d. Evapotranspiration from alveolus reservoir to substrate

The evapotranspiration flow depends on the water level in the alveolus reservoir. The coefficient K_{ALV} allows to adapt the evapotranspiration flow depending on the water level in the alveolus reservoir.

$$ETR_{ALV} = \min(K_{ALV} \times ETP_{TTV}, h_{ALV} \times \frac{3600}{\Delta t}) \quad \text{eq.10}$$

$$K_{ALV} = \left(\frac{h_{ALV}}{C_{ALV}}\right)^\alpha \quad \text{eq.11}$$

According to Payet (2019), the optimum value is $\alpha = 1$. This value is valid for the particular case of France, but shall be adapted when the simulation is carried out for other climates.

e. Evapotranspiration from the substrate to the atmosphere

One assumes that the substrate water content is at its maximum capacity as long as water is available in the alveolus reservoir and starts to decrease when the alveolus reservoir is empty. Both equations below describe this phenomenon:

$$h_{ALV} > 0; ETR_{SUBS} = ETR_{ALV} \quad \text{eq. 12}$$

$$h_{ALV} = 0; ETR_{SUBS} = \min(ETP_{ttv}, h_{SUBS} \times \frac{3600}{\Delta t}) \quad \text{eq. 13}$$

f. Infiltration from the substrate into the alveolus reservoir

If the inflows into the substrate lead to a storage that would be greater than the maximum capacity C_{SUBS} , the excess water is transferred directly into the alveolus reservoir, according to the following equation:

$$I = \max \left(h_{SUBS} \times \frac{3600}{\Delta t} + I_p - ETR_{SUBS} + ETR_{ALV} - C_{SUBS} \times \frac{3600}{\Delta t}, 0 \right) \quad \text{eq. 14}$$

g. Reservoirs storage and overflow of the alveolus reservoir

After the determination of evapotranspiration from the substrate and the alveolus reservoirs, and the determination of infiltration into the alveolus reservoir, the update of the water level in each reservoir is necessary. In addition, when the water level in the alveolus reservoir exceeds its maximum storage capacity, the surplus of water is evacuated by the roof downpipes.

$$h_{SUBS_{i+1}} = \min \left(h_{SUBS_i} + I_p \times \frac{\Delta t}{3600} - (ETR_{SUBS_i} + ETR_{ALV_i} - I_i) \times \frac{\Delta t}{3600}, C_{SUBS} \right) \quad \text{eq. 15}$$

$$V_{overflow} = \max \left([h_{ALV} - (ETR_{ALV} + I) \times \frac{\Delta t}{3600} - C_{ALV}] \times S_{facility}, 0 \right) \quad \text{eq. 16}$$

$$h_{ALV_{i+1}} = \min \left(h_{ALV_i} - (ETR_{ALV_i} + I_i) \times \frac{\Delta t}{3600}, C_{ALV} \right) \quad \text{eq. 17}$$

The rainfall evacuation can be of two types: either by regulated outflow or by overflow.

Connection of the elements

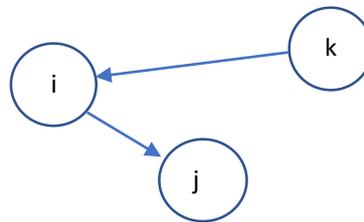
1. Connexions description

In order to create stormwater management systems which combine several technical elements, the software allows connexions between the various elements presented in the previous paragraphs. Users define the direction of water transfers between the elements. Transferred flows can be of three types: regulated outflow, overflow and infiltration flow.

The connections between elements of the stormwater management system are saved in a global connection matrix, in which each element of the system corresponds to one line and one column. Each element of the matrix can take three different values, expressing a relationship between two elements of the system:

- 1 : the element in the line transfers water to element in the column
- -1 : the element in the line receive water flow from the element in the column
- 0 : no connection between the two elements.

An example of a 3-element system and its connections matrix is shown below:



$$\begin{array}{c}
 i \quad j \quad k \\
 i \quad \begin{pmatrix} 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \\
 j \\
 k
 \end{array}$$

With this matrix method, all connections data of the system are stored in a simple and efficient way, making the use of the data easy for calculations.

2. Flow equation

A lag time for in-pipe water transfers must be estimated by the user. The software proposes an estimation based on four parameters of the pipe: diameter, length, slope and roughness corresponding to its material.

The mean flow velocity in the pipe is calculated with the Manning-Strickler equation:

$$V = K_s * R_h^{\frac{2}{3}} * i^{\frac{1}{2}} \tag{eq. 18}$$

Then the lag time is calculated according to the length of the pipe between the two elements:

$$t = \frac{l}{V} \tag{eq. 19}$$

References

Rawls W.J., Brakensiek D.L., Miller N. (1983). Green-Ampt infiltration parameters from soils data. *Journal of Hydraulic Engineering*, 109(1), [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1983\)109:1\(62\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1983)109:1(62)).

Payet C. (2019). Action – Recherche du Cerema : évaluation d'une toiture terrasse végétalisée à zéro rejet. Cerema Île-de-France, Livrable n°3 : rapport final.

Sandoval S., Filippi R., Houssin E., Beauvisage L., Bournique R., Bertrand-Krajewski J.-L. (2019). A simulation tool for comparing the hydrological performance of various associated stormwater source-control techniques at the scale of buildings and blocks. *Proceedings of Novatech 2019*, Lyon, France, 01-05 July, 4 p.