

Modélisation des échanges surface/subsurface dans l'hydrologie d'un bassin versant : de l'échelle de la parcelle à celle du bassin

WEILL Sylvain

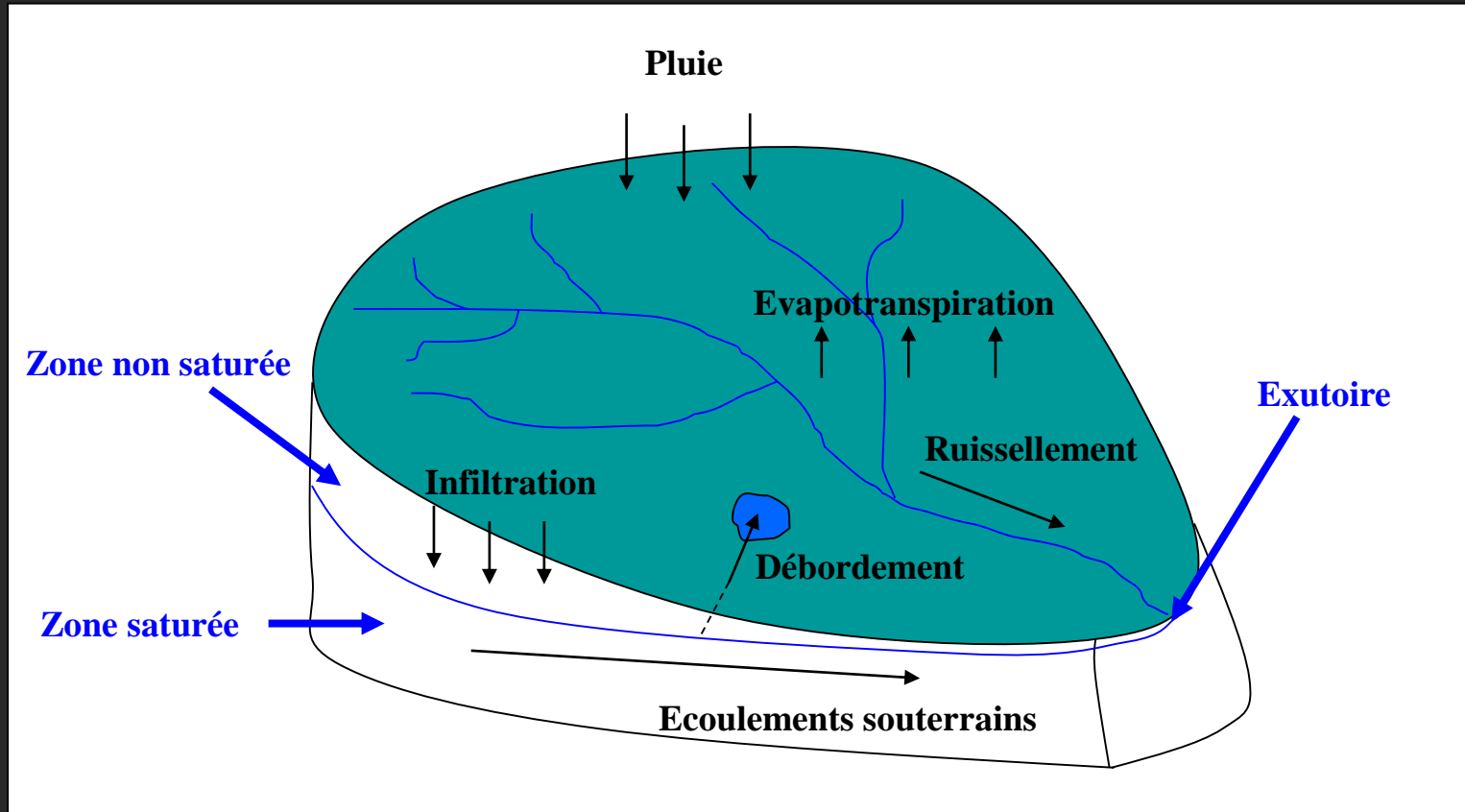
Thèse encadrée par E. Mouche (CEA) et
E. Ledoux (Mines de Paris)

*Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement,
CEA-CNRS, Orme des Merisiers, 91191 Gif sur Yvette, FRANCE*



Objet d'étude : le bassin versant

Définition : Aire géographique drainée par une rivière. Unité de base en hydrologie pour réaliser des bilans hydriques.

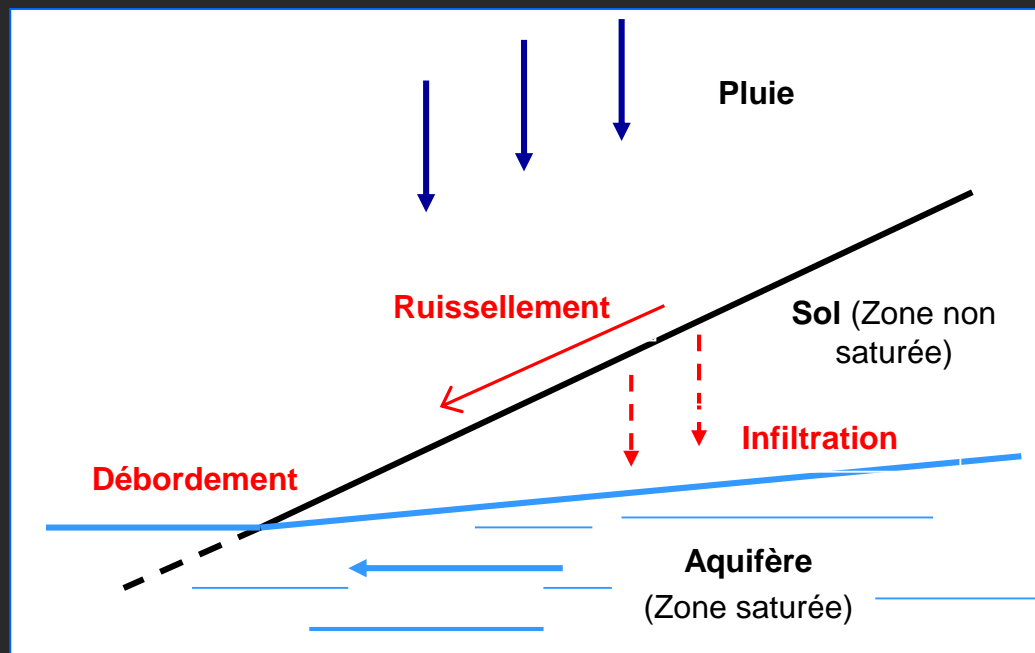


→ **Constat de départ** : le partage et les interactions ruissellement/infiltration sont souvent mal modélisés (découplage/couplage faible des processus de surface et de subsurface, changement de conditions aux limites en surface, routage de l'eau, pas de réinfiltration possible...)



Objectifs de la thèse

- Développer un **outil de modélisation** permettant de **mieux modéliser le cycle de l'eau** à l'échelle d'un bassin versant en traitant de façon continue les interactions entre les processus de surface et de subsurface
- Mieux comprendre les conditions d'apparition d'un régime de ruissellement et les processus d'alimentation du réseau hydrographique
- Introduire une composante de transport dans notre outil pour pouvoir reproduire des expériences de traçage
 - Problème de la séparation d'hydrogramme : Déterminer quelle eau, l'eau ancienne ou l'eau de l'événement pluvieux, participe à l'écoulement en rivière



Le phénomène de ruissellement

- On peut distinguer trois types de ruissellement :

- **Le ruissellement par dépassement de l'infiltrabilité ou ruissellement de Horton :**

Il se produit quand l'intensité de la pluie est trop forte. Le sol n'est pas capable d'infiltrer la totalité de la pluie, il y a accumulation d'eau en surface puis ruissellement.

- **Le ruissellement par saturation du sol ou ruissellement de Cappelis:**

L'eau de pluie s'infiltré, recharge la nappe, le sol se resature « par le bas », l'eau de pluie qui tombe sur les surface saturée du sol ne peut pas s'infiltrer, s'accumule et se met à ruisseler.

- **Le ruissellement alimenté par l'exfiltration :**

L'organisation des écoulements dans le domaine considéré conduit de l'eau du sol à sortir à travers la surface, c'est le phénomène d'exfiltration. L'eau s'accumule en surface et participe au phénomène de ruissellement.



L'approche multi-domaine darcéens (1)

- **Notre modèle (1)** : développer un modèle dans lequel chaque processus est décrit par une équation de type Darcy

Zone non saturée : équation de Richards

$$C(h) \frac{\partial h}{\partial t} = -\vec{\nabla} \cdot (-K(h)(\vec{\nabla}h + \vec{\nabla}z))$$

Zone saturée : équation de Darcy

$$S \frac{\partial h}{\partial t} = -\vec{\nabla} \cdot (-K_{SAT}(\vec{\nabla}h + \vec{\nabla}z))$$

Surface : approximation de l'onde diffusive
+ relation de Manning pour la vitesse

$$\frac{\partial(h_s)}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{h_s^{5/3}}{n\sqrt{S}} \frac{\partial}{\partial x} (h_s + z_s) \right)$$

avec : h_s = épaisseur de lame d'eau , z_s = cote du sol, n = coefficient de Manning, S = pente de la surface

→ On modélise les processus de surface comme des écoulements en milieux poreux dans une couche de surface, appelée couche de ruissellement, aux propriétés particulières



L'approche multi-domaine darcéens (2)

- Notre modèle (2) :

- Les équations de surface doivent être valides pour la gamme entière des valeurs de h_s
 - On introduit une **perméabilité résiduelle** ε pour les valeurs négatives de h_s
- La couche de ruissellement ne doit pas perturber le processus d'infiltration
 - On introduit une **composante verticale de perméabilité très forte** K_{zz} dans la couche pour que le flux à la surface du sol égal le flux de pluie imposé au sommet de la couche

La perméabilité dans la couche vaut alors:

$$\vec{K}(h_s) = \left(\frac{h_s^{5/3}}{n\sqrt{S}} + \varepsilon \right) \vec{i} + K_{zz} \vec{z}$$

$$K_{zz} \gg K_{sat}$$

- Intérêts :

- Un seul système non linéaire avec des paramètres domaines-dépendants à résoudre pour prendre en compte à la fois les processus de surface et de subsurface
- Pression et vitesse sont continues à l'interface entre le domaine sol et la couche de ruissellement
 - **Couplage fort** entre surface et subsurface (comme dans VanderKwaak (Thèse publiée en 1999, Université de Waterloo) et Beaugendre (Journal of Hydrology, 2006))



Résumé

Couche de ruissellement : onde diffusive ~ Darcy non linéaire

Surface réelle du sol

Domaine sol (ZNS + ZS) : Darcy + Richard

Φ_{pluie}



$\Phi_{\text{sol}} = \beta \Phi_{\text{pluie}}$

β dépend de l'état de saturation du sol en surface et varie entre 0 et 1

- Continuité des pressions et des flux à la surface du sol → couplage fort
- Possibilité de gérer un ruissellement de type hortonien ou un ruissellement par débordement
- La couche de ruissellement sert à modéliser l'écoulement dans le réseau hydrographique
- Possibilité d'introduire les effets liés à la microtopographie dans les lois caractéristiques de la couche et ceux liés à l'existence d'une couche de battance



Résolution numérique

- Modèle implémenté dans le code de calcul CAST3M (www-cast3m.cea.fr)
- Equations résolues en utilisant une formulation Eléments Finis Mixtes Hybrides
- Algorithme de Picard pour résoudre la non linéarité (n indice du pas de temps, i indice de l'itération) :

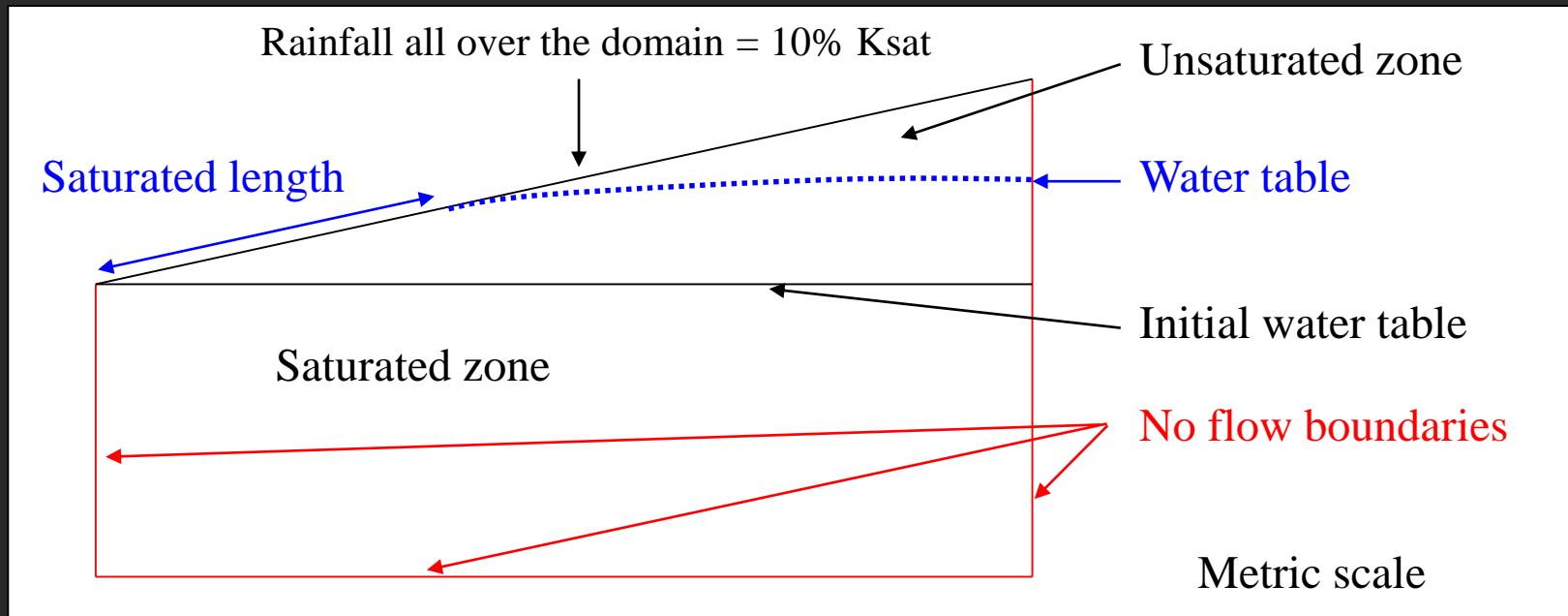
$$C(h^{n+1,i}) \frac{H^{n+1,i+1} - H^n}{\Delta t} = -\vec{\nabla} \cdot (-K(h^{n+1,i}) (\vec{\nabla} h^{n+1,i+1} + \vec{\nabla} z))$$

- Utilisation de sous relaxation pour évaluer les termes non linéaires à l'intérieur des itérations (α choisit entre 0 et 1) :

$$C(\alpha h^{n+1,i} + (1-\alpha)h^{n+1,i-1}) \frac{H^{n+1,i+1} - H^n}{\Delta t} = -\vec{\nabla} \cdot (-K(\alpha h^{n+1,i} + (1-\alpha)h^{n+1,i-1}) (\vec{\nabla} h^{n+1,i+1} + \vec{\nabla} z))$$



Le système d'Abdul & Gillham (W.R.R. 1984)

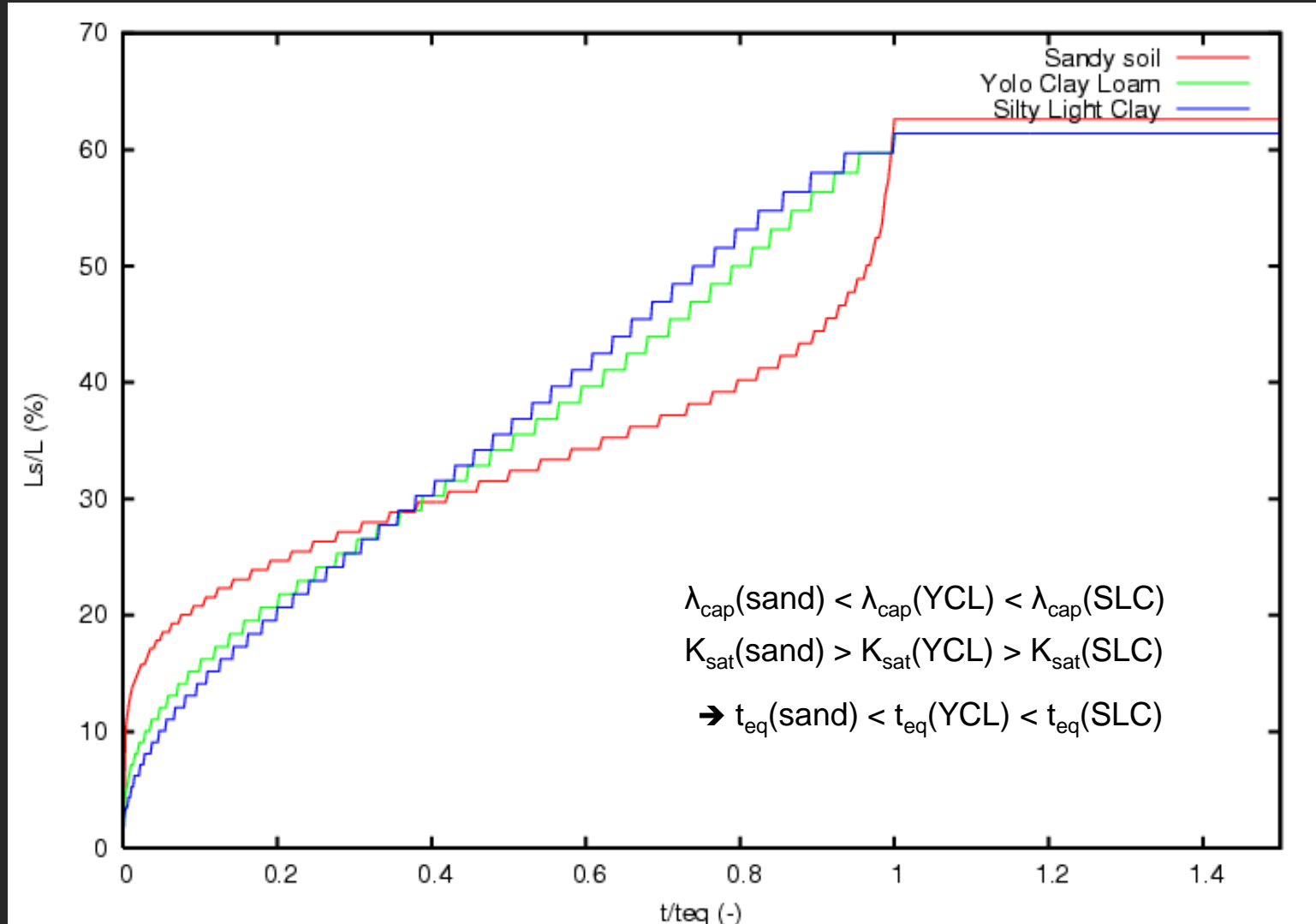


- Système expérimental créé pour étudier l'influence de la frange capillaire sur la génération du régime de ruissellement
- Système difficile à modéliser puisque la surface du sol est la seule surface d'échange
- Système utilisé pour valider notre approche de modélisation dans le cas d'un régime de débordement
- On utilise pour la loi de saturation une loi de type Van Genuchten



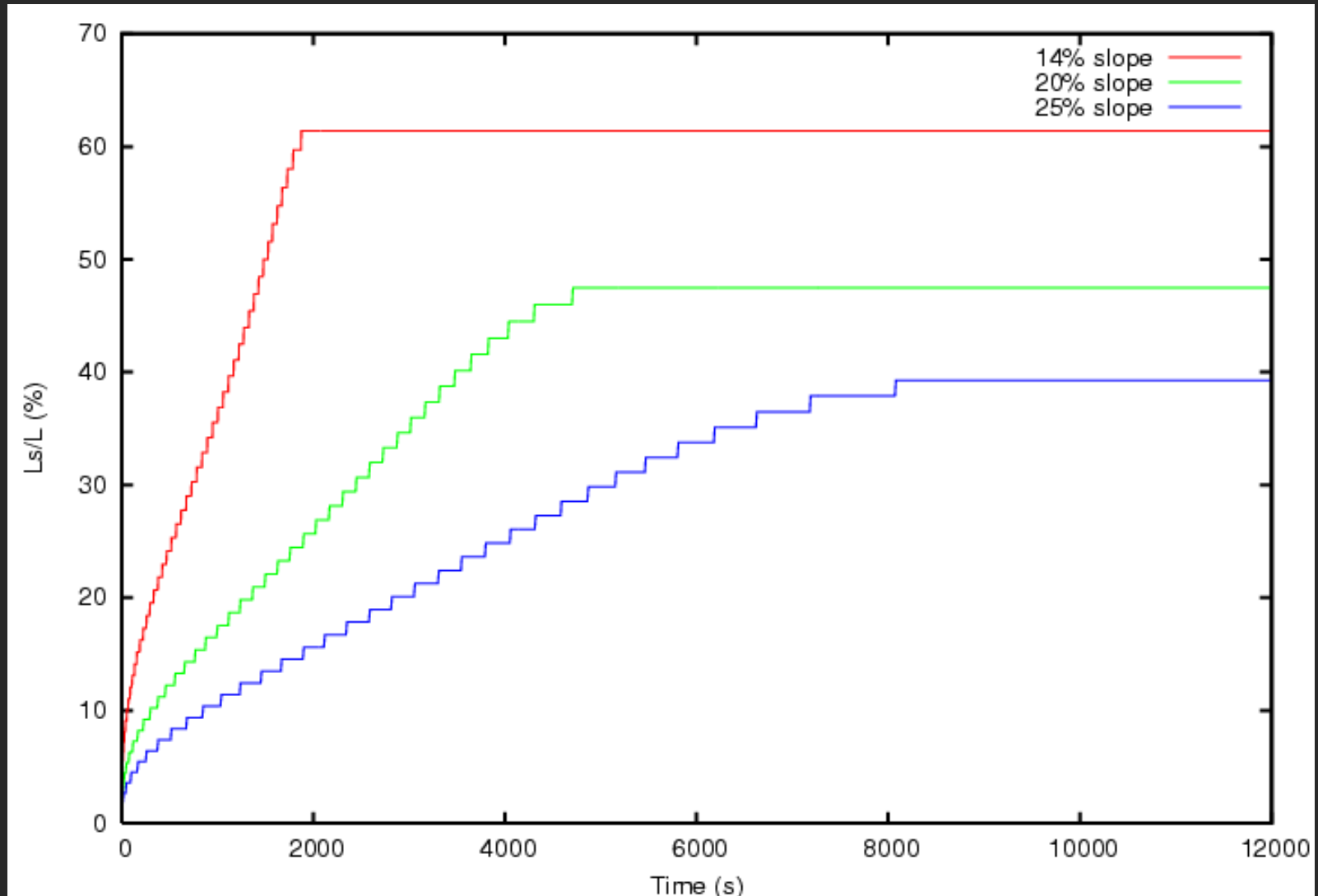
Résultats (1)

→ Evolution de la longueur saturée normalisée pour trois types de sol différents en fonction du temps normalisé



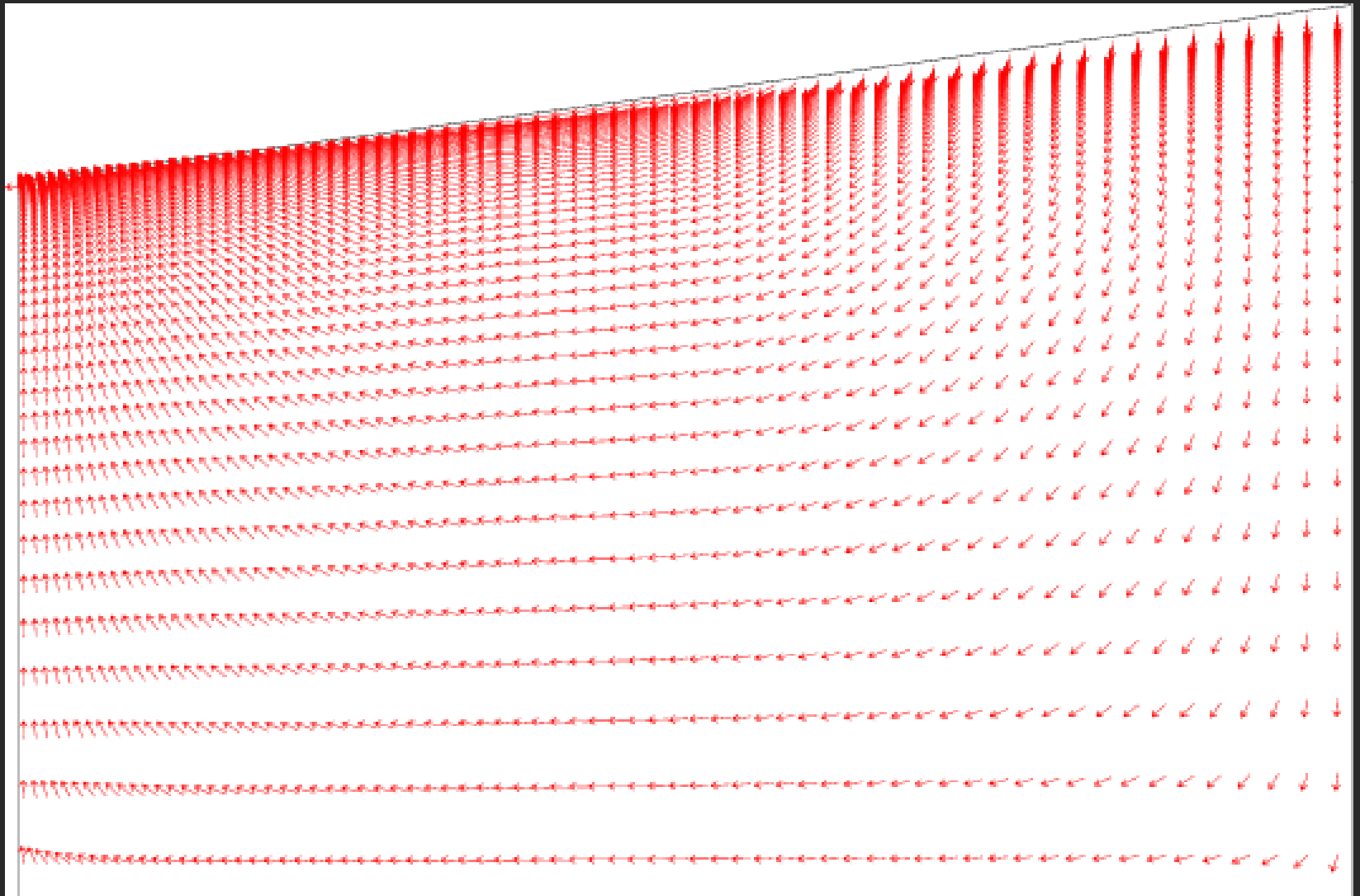
Résultats (2)

→ Evolution de la longueur saturée normalisée pour trois valeurs de pentes en fonction du temps pour le sol YCL



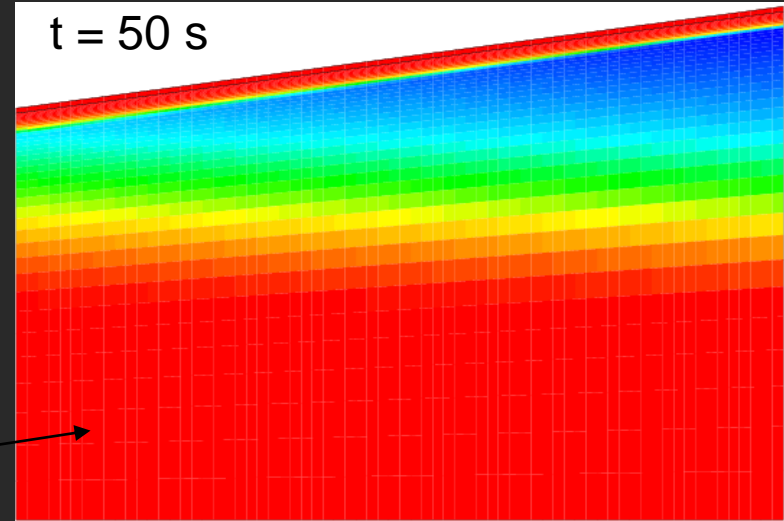
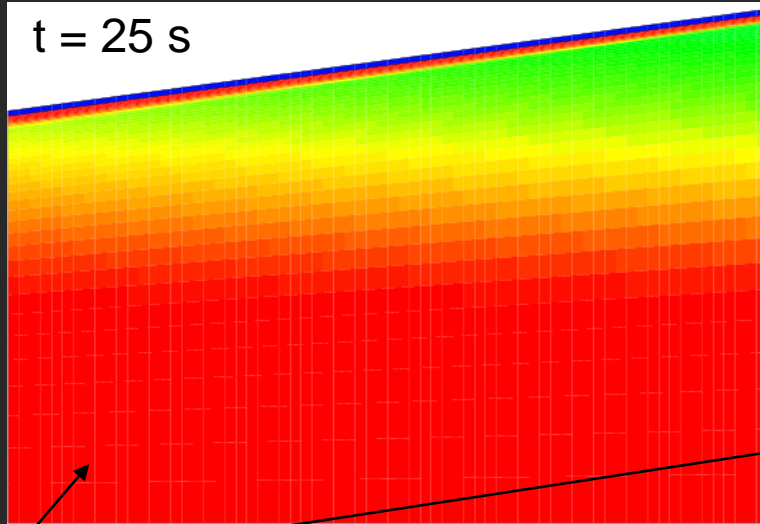
Résultats (3)

→ Champ de vitesse au permanent pour le sol YCL



Régime Hortonien

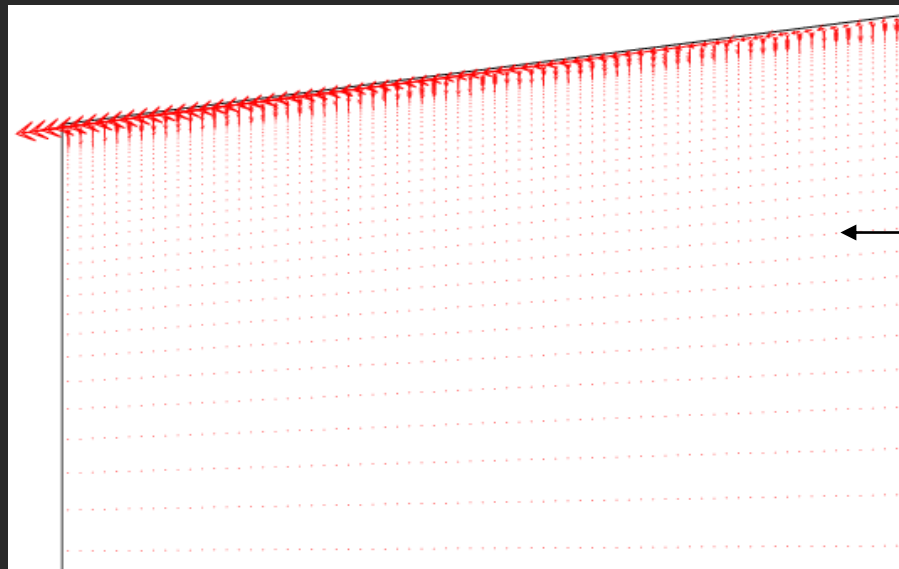
→ On utilise la géométrie du système d'Abdul & Gillham pour vérifier si notre système peut gérer un ruissellement de type Hortonien



Champ de saturation

Dans la couche:

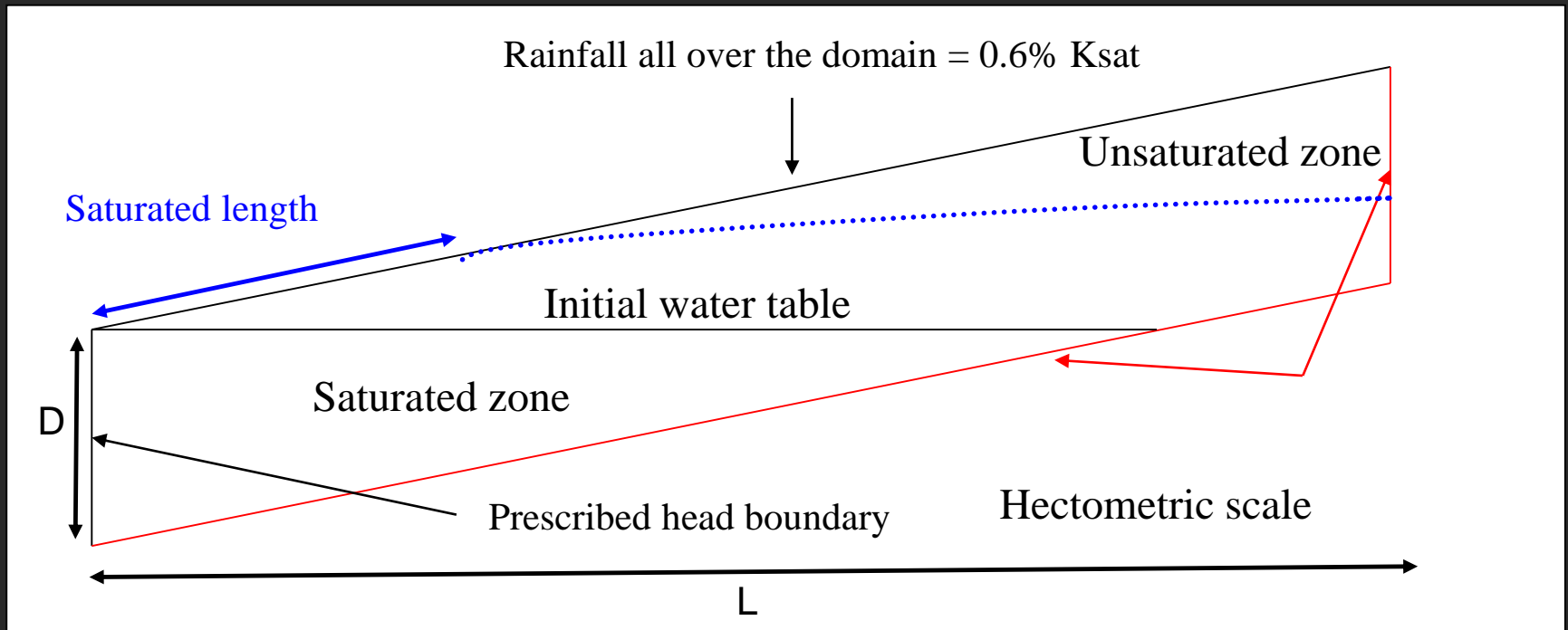
- Bleu = pas de ruissellement
- Rouge = ruissellement



← Champ de vitesse



Le système de Ogden & Watts (W.R.R. 2000)

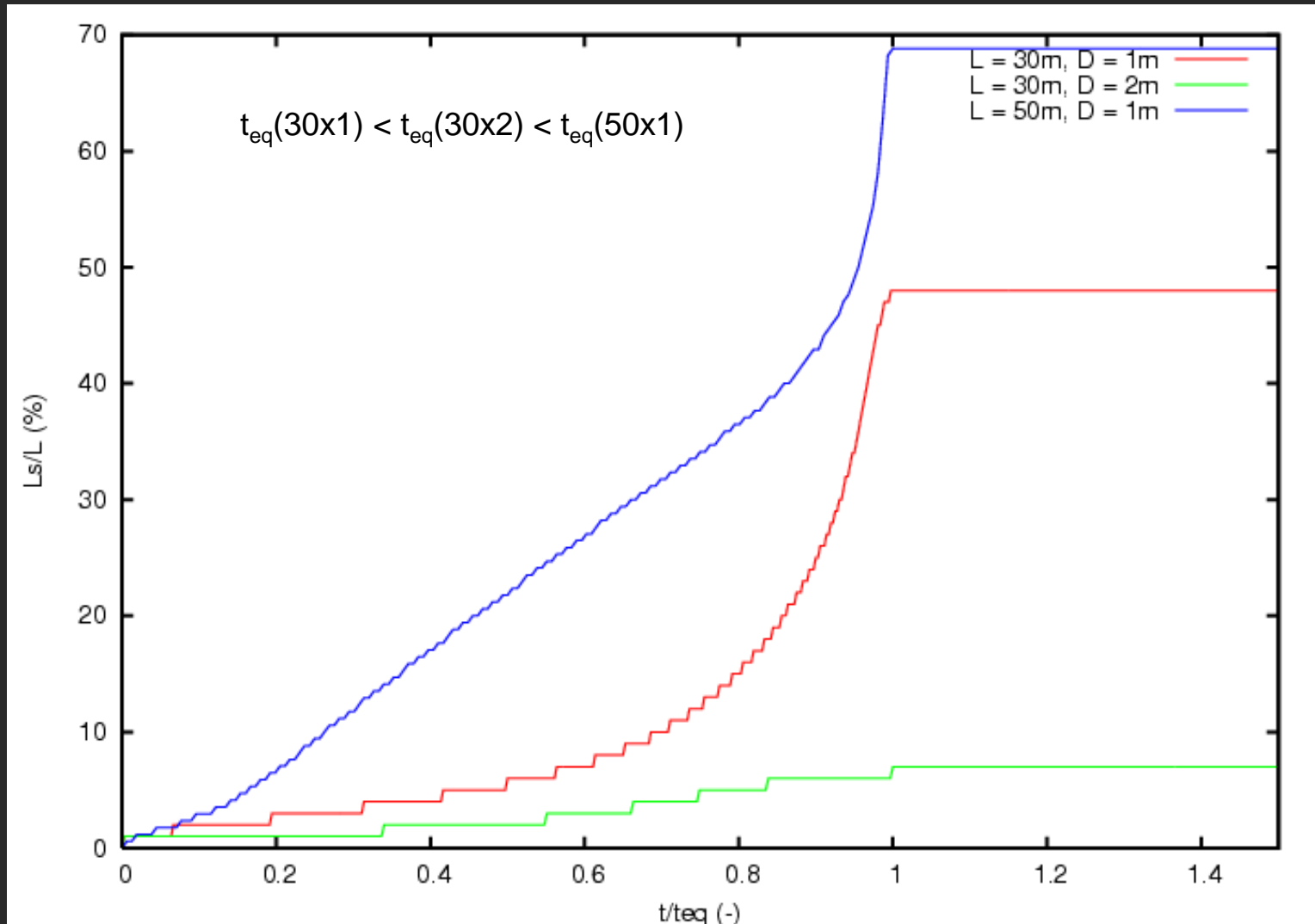


- Système étudié pour comprendre l'influence de différents paramètres géométriques (pente, longueur, profondeur...) sur la génération du processus de ruissellement
 - Le sol utilisé est très perméable et a une longueur capillaire très grande. Le système est initialement presque entièrement saturé
- Cinétique particulière de débordement intéressante à modéliser

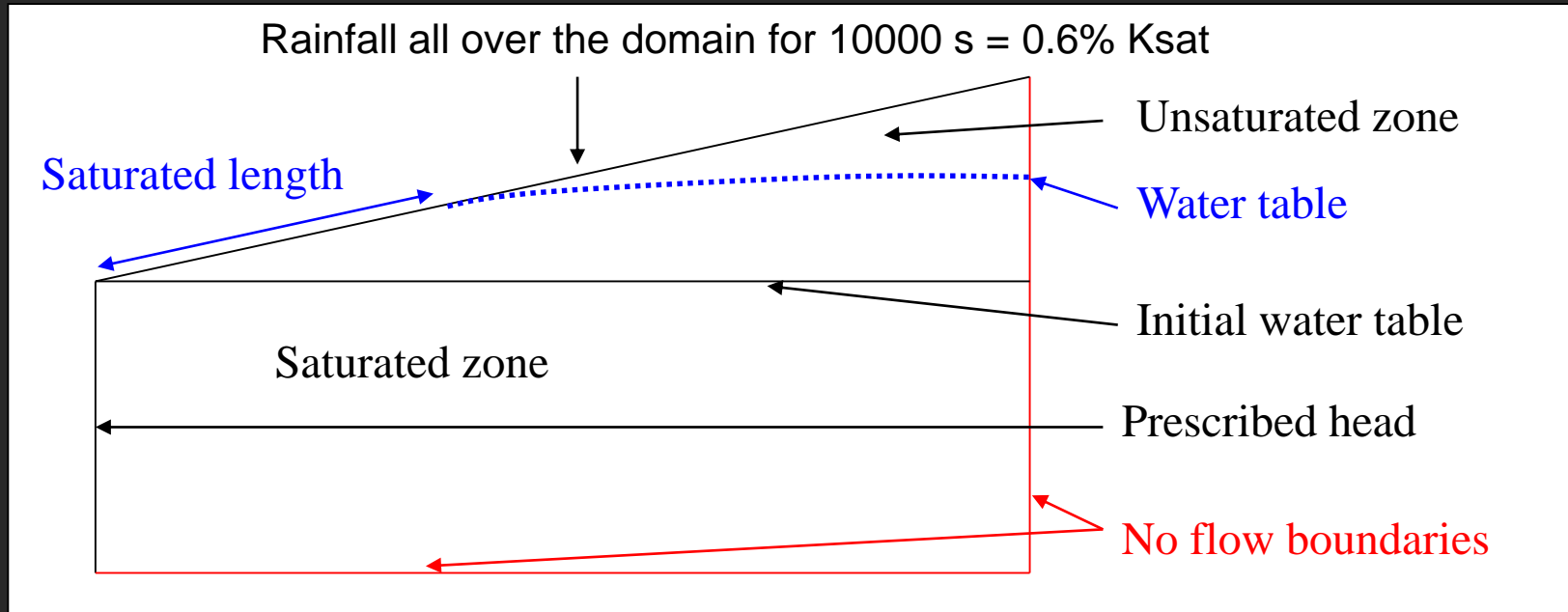


Résultats

→ Evolution de la longueur saturée normalisée en fonction du temps normalisé pour trois géométries différentes



Cas d'un créneau de pluie

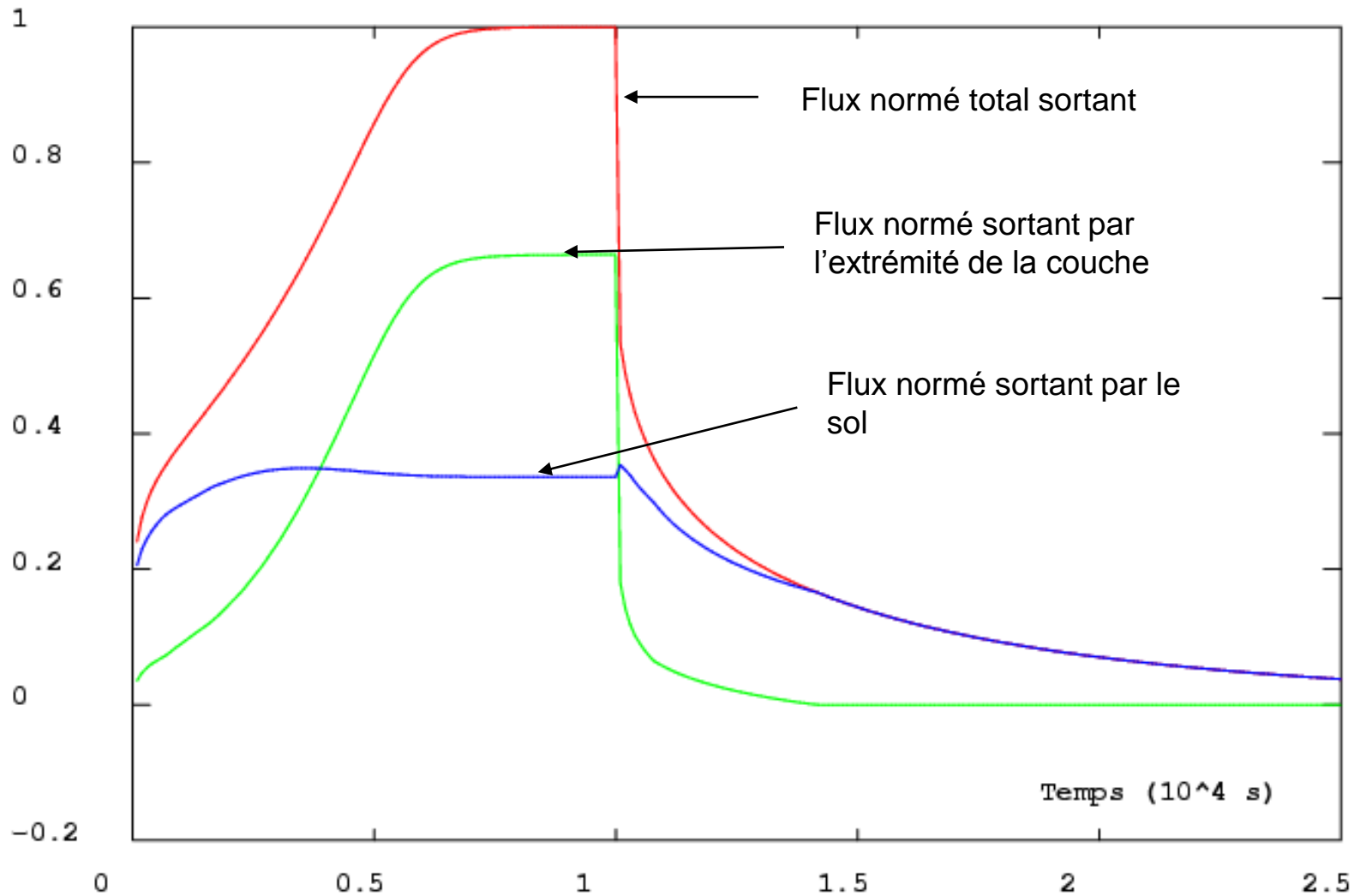


- Dimensions : $L = 30 \text{ m}$, $H = 1\text{-}4\text{m}$, pente de 10%
- On utilise le même sol que celui du cas précédent : grande longueur capillaire et forte perméabilité
- Géométrie d'Abdul, caractéristiques de sol et conditions aux limites de Ogden
- On impose un créneau en pluie pour observer la mise en charge et la relaxation du système



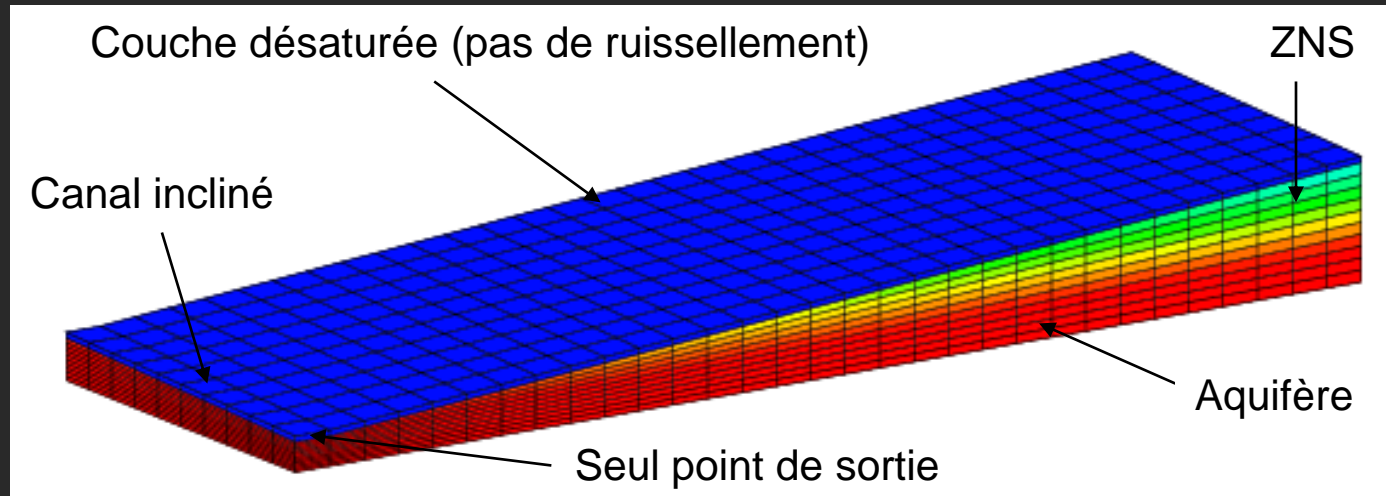
Résultats

Evolution des flux normés sortants par la couche, le sol et total



Cas 3D

→ On utilise une géométrie présentée dans [Govindaraju & Kavvas \(WRR,1991\)](#) pour tester la capacité de notre modèle à reproduire les écoulements en 3D : cas représentant la croissance et décroissance d'une zone saturée contributive

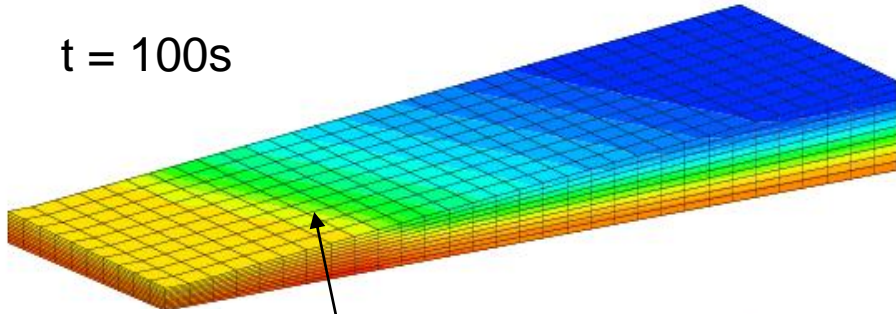


- Dimensions : 30 m de largeur, 10 m de longueur, épaisseur de 25 cm à 1.25 m
- Pente canal = 1%, pente sol = 5%
- Sol utilisé = YCL, pluie = 20% du Ksat pendant 60 minutes
- Condition initiale hydrostatique

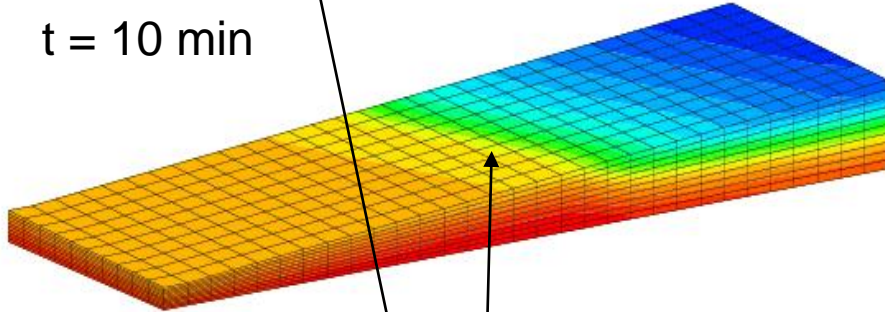


Résultats : évolution des surfaces saturées contributives

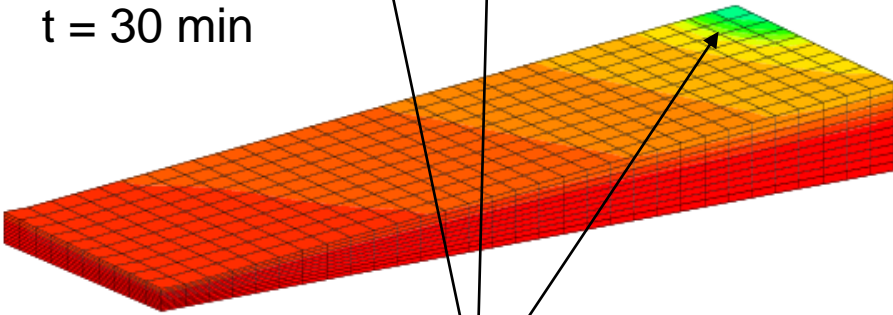
t = 100s



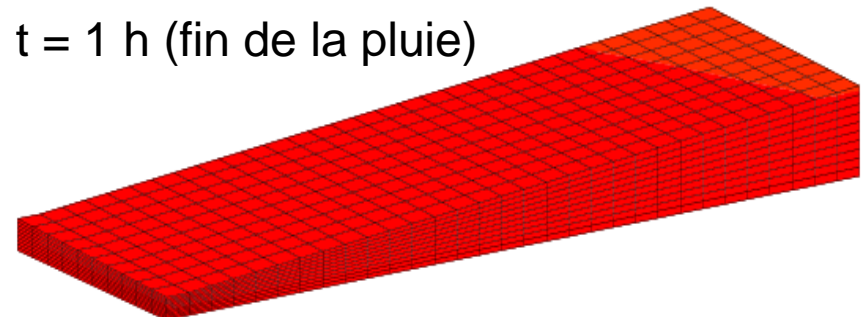
t = 10 min



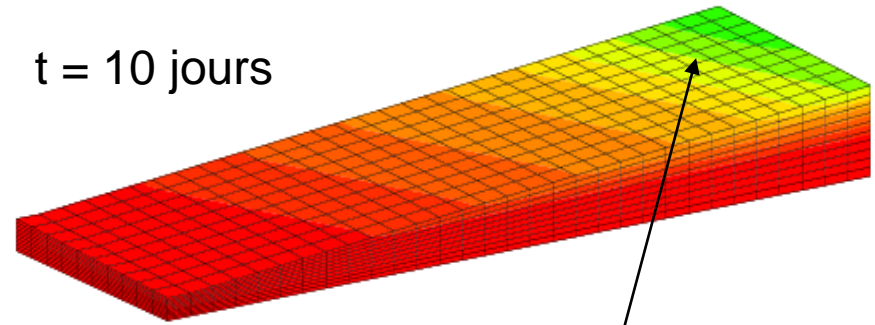
t = 30 min



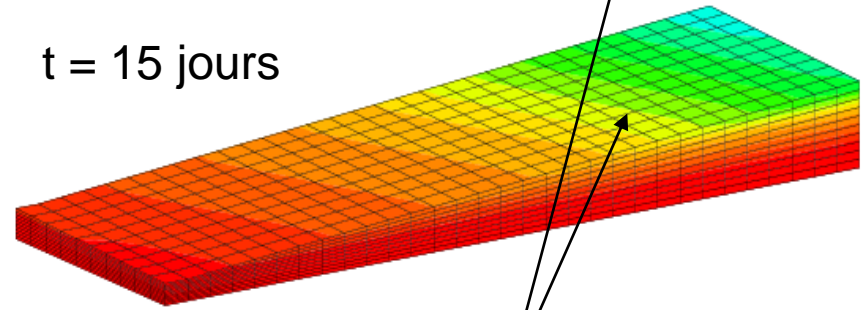
t = 1 h (fin de la pluie)



t = 10 jours



t = 15 jours



Ligne de débordement = isopression zéro (limite jaune/vert)



Conclusions et perspectives

- **Conclusions :**

- Les résultats 2D et 3D en hydro pur sont en accord avec ceux présentés dans la littérature
- Notre approche permet de modéliser différents types de ruissellement (ruissellement hortonien, débordement...) et la dynamique des systèmes sujets à ce processus (évolution de surfaces contributives,..)
- La convergence est dure à obtenir. La dynamique de ces systèmes est très non linéaire et dépend d'une multitude de paramètres : lois de saturation et paramètres associés, intensité de la pluie, géométrie du domaine...

- **Travail en cours/Perspectives :**

- Implémentation d'un modèle de transport
- Validation du modèle sur un bassin versant réel
- Reproduction d'expériences de traçage

