

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

WEILL Sylvain

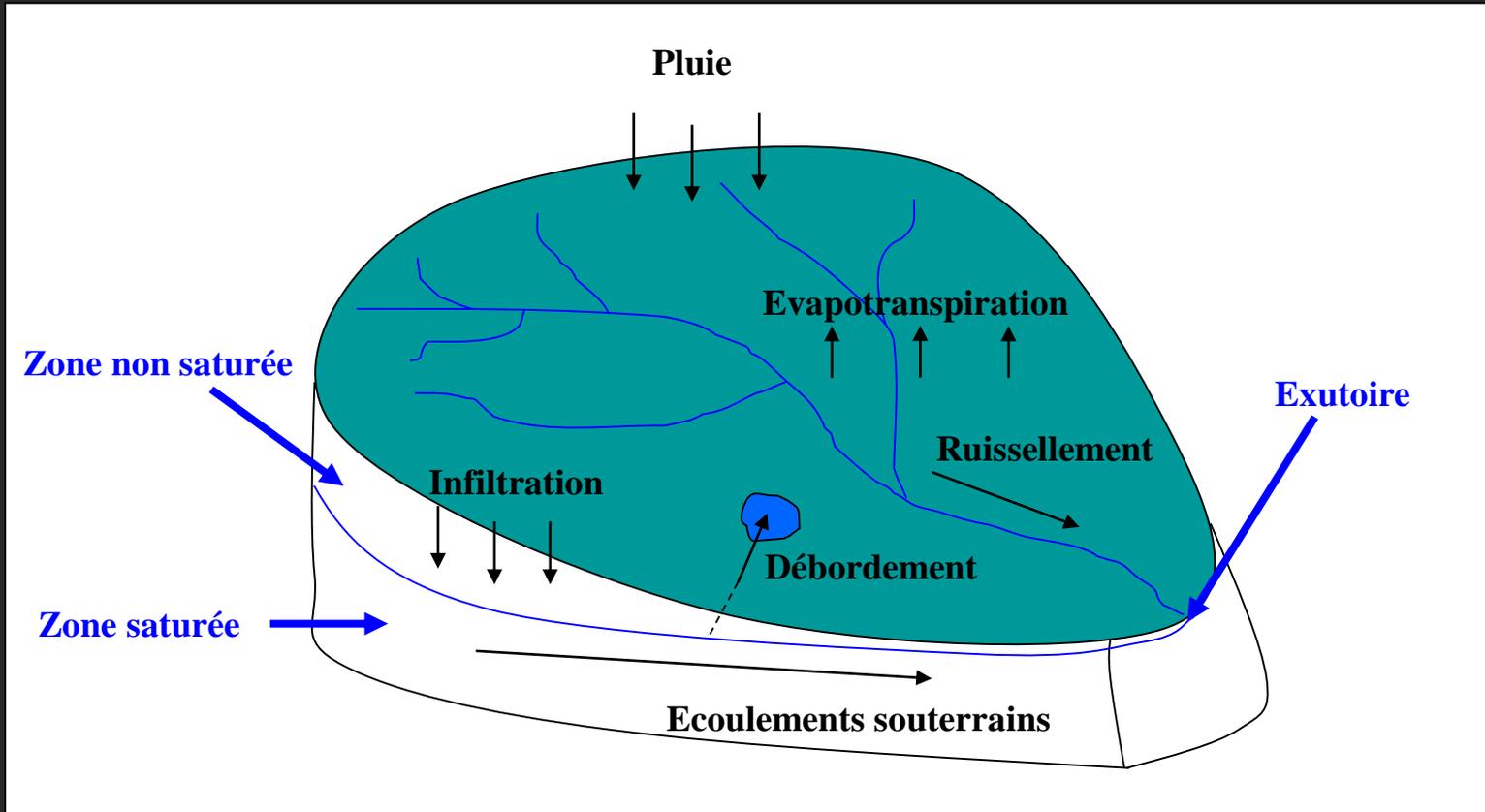
Thèse encadrée par E. Mouche (CEA) et  
E. Ledoux (Mines de Paris)

*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.

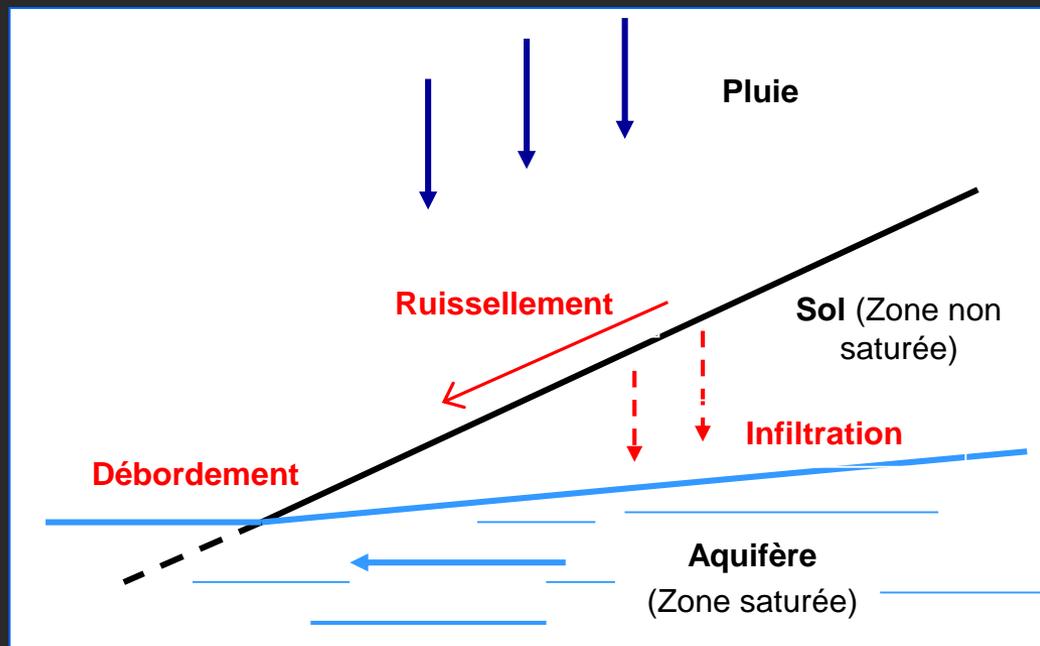


→ **Constat de départ** : le partage et les interactions ruissellement/infiltration sont souvent mal modélisés (découplage/couplage faible des processus de surface et de subsurface, changement de conditions aux limites en surface, routage de l'eau, pas de réinfiltration possible...)



# 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**  $\varepsilon$  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

$\Phi_{\text{pluie}}$



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

$\beta$  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](http://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) :

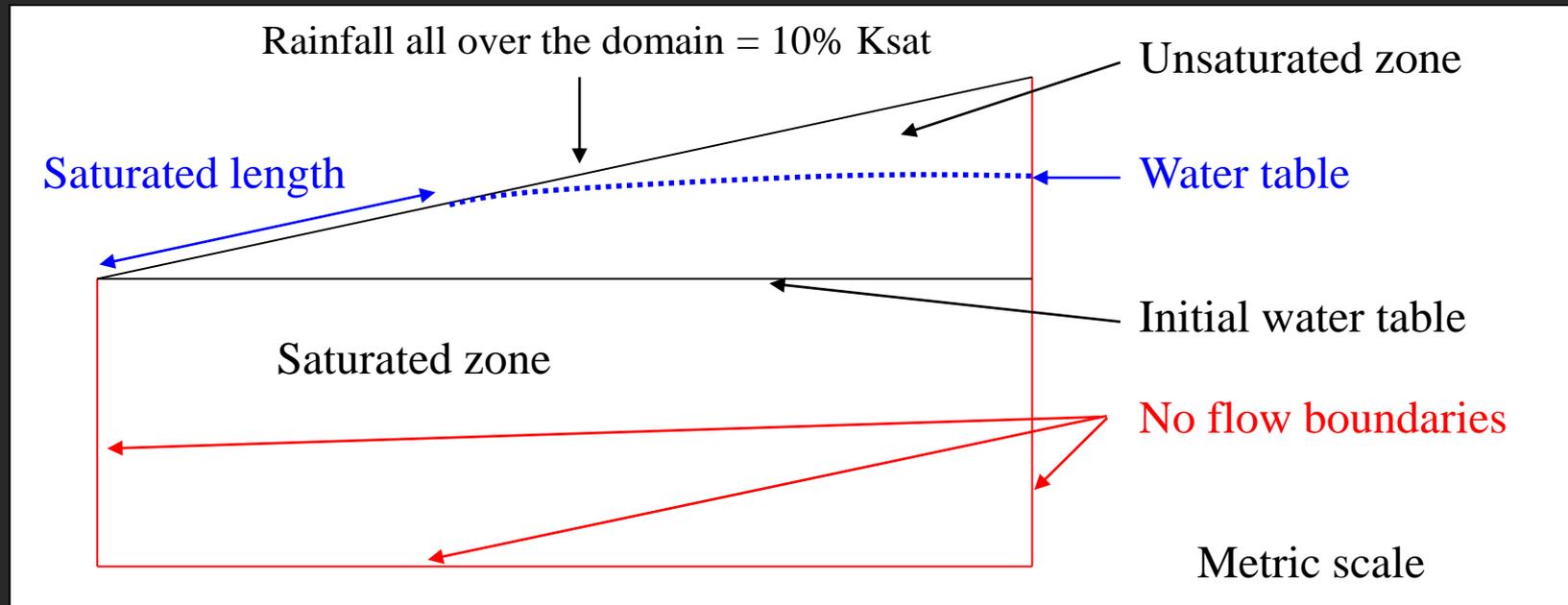
$$C(h^{n+1,i}) \frac{H^{n+1,i+1} - H^n}{\Delta t} = -\vec{\nabla} \cdot (-K(h^{n+1,i}) (\vec{\nabla} h^{n+1,i+1} + \vec{\nabla} z))$$

- Utilisation de sous relaxation pour évaluer les termes non linéaires à l'intérieur des itérations ( $\alpha$  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)

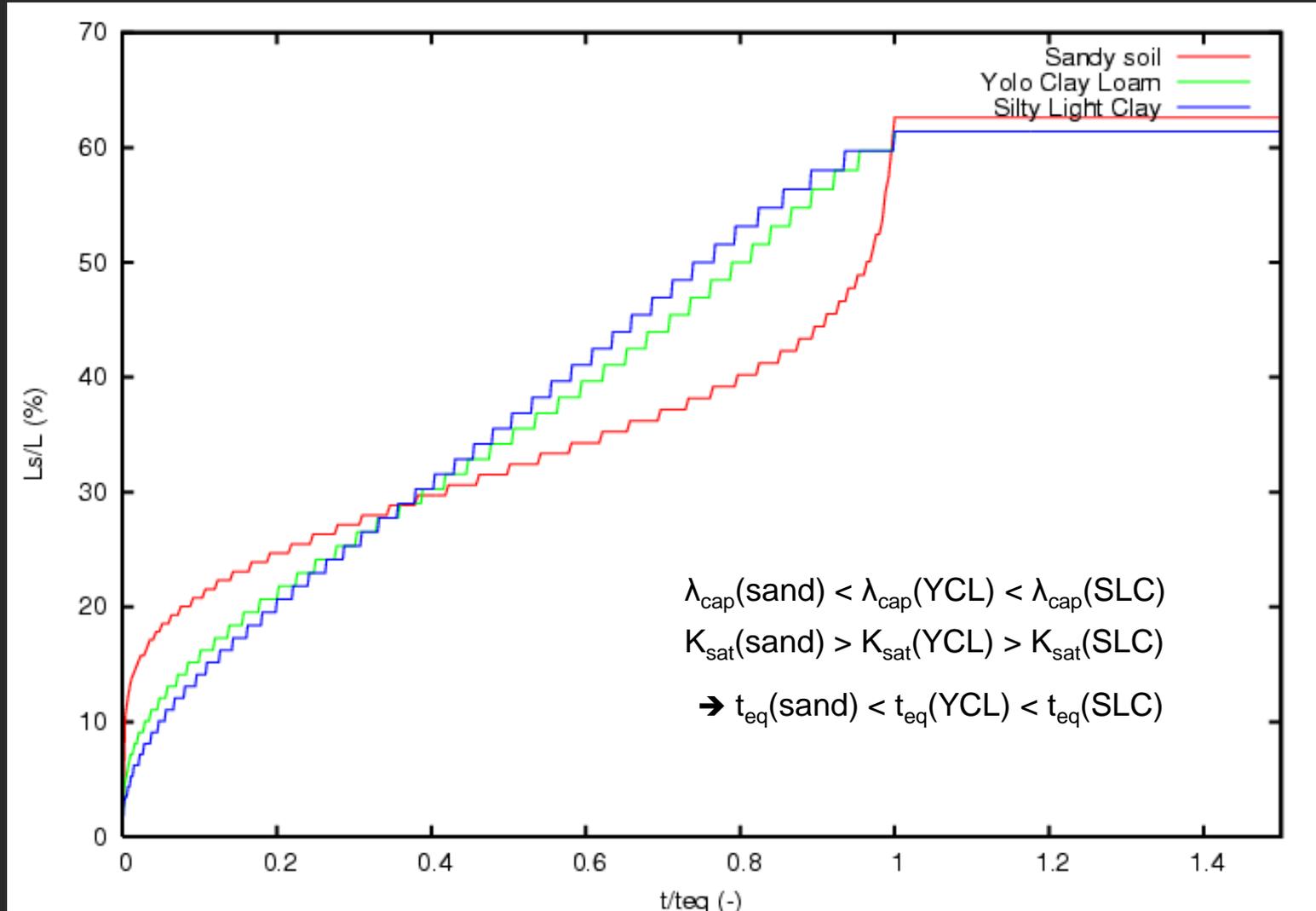


- Système expérimental créé pour étudier l'influence de la frange capillaire sur la génération du régime de ruissellement
- Système difficile à modéliser puisque la surface du sol est la seule surface d'échange
- Système utilisé pour valider notre approche de modélisation dans le cas d'un régime de débordement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



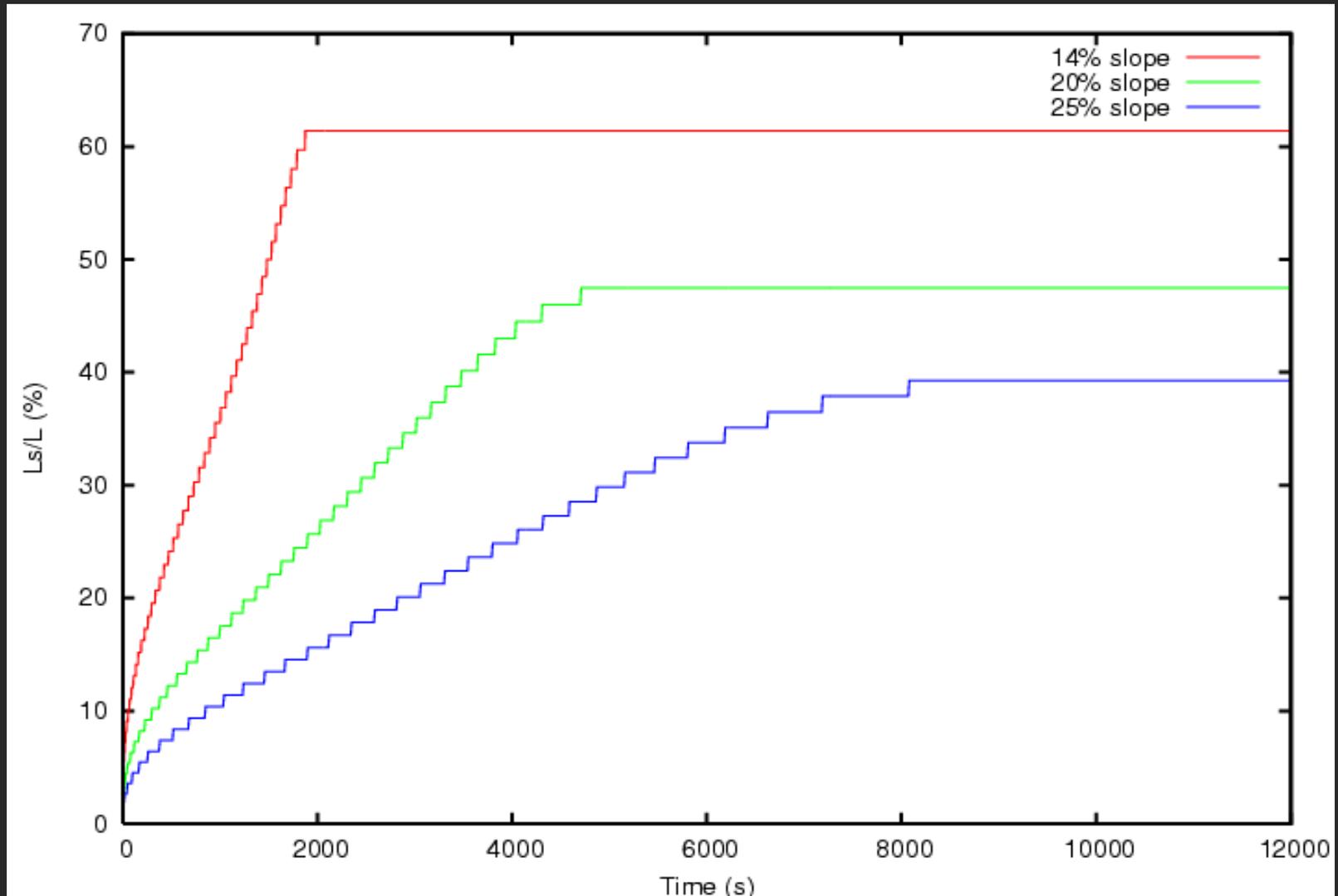
# Résultats (1)

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



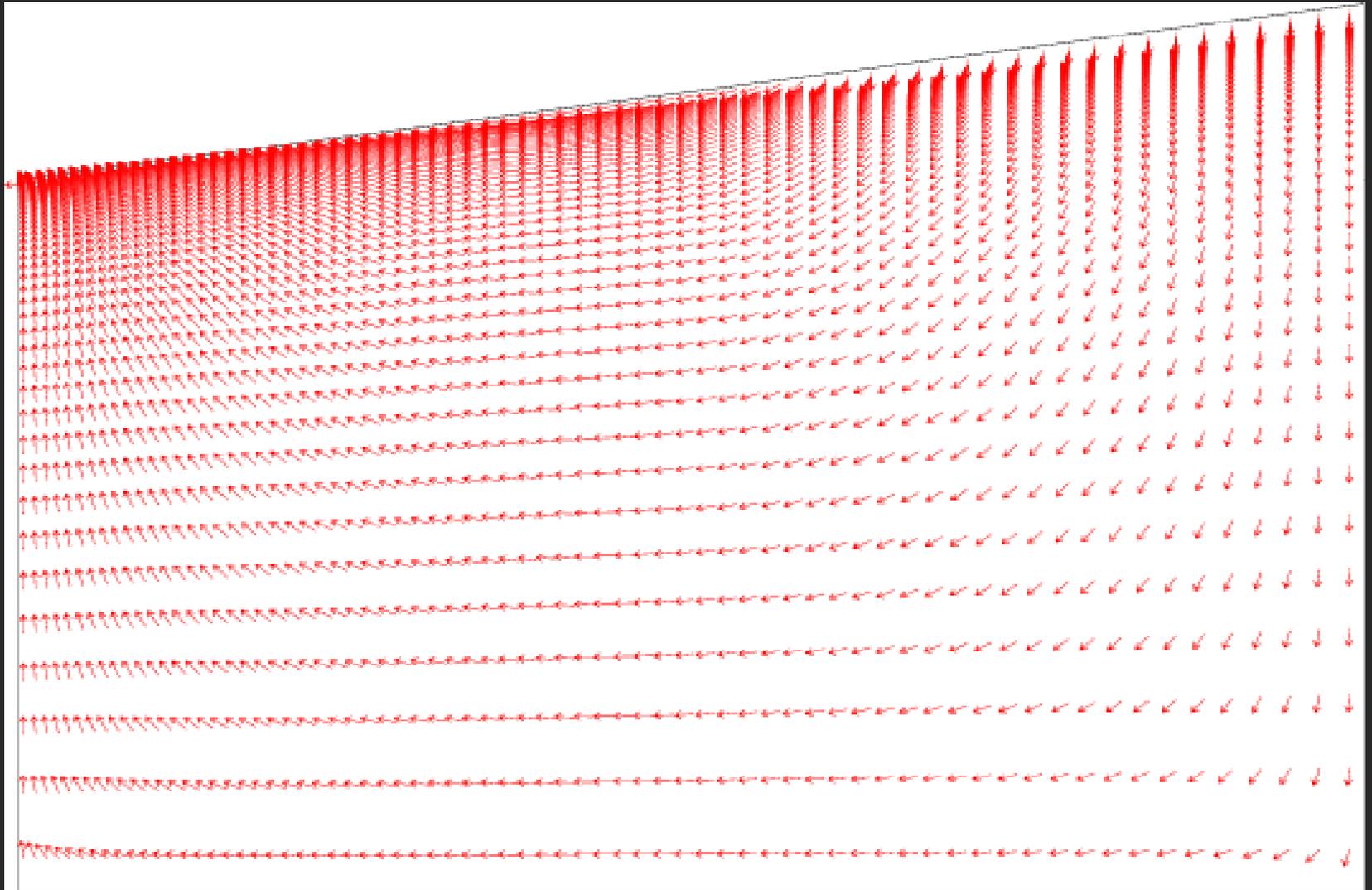
# Résultats (2)

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



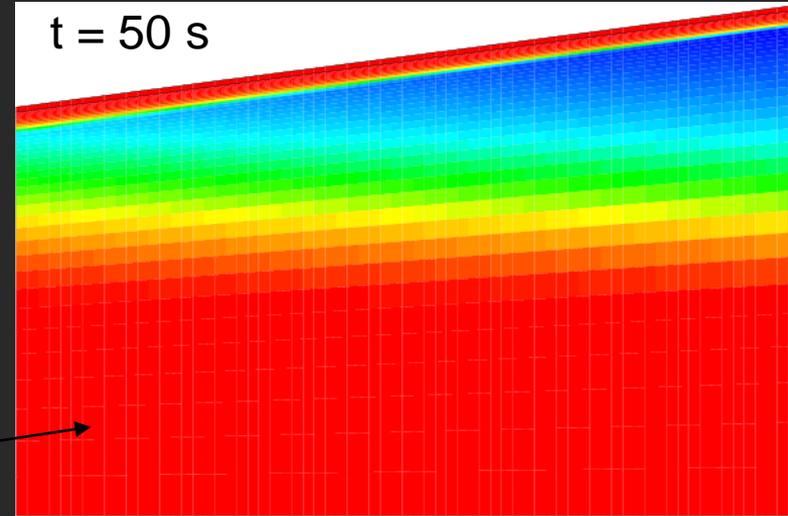
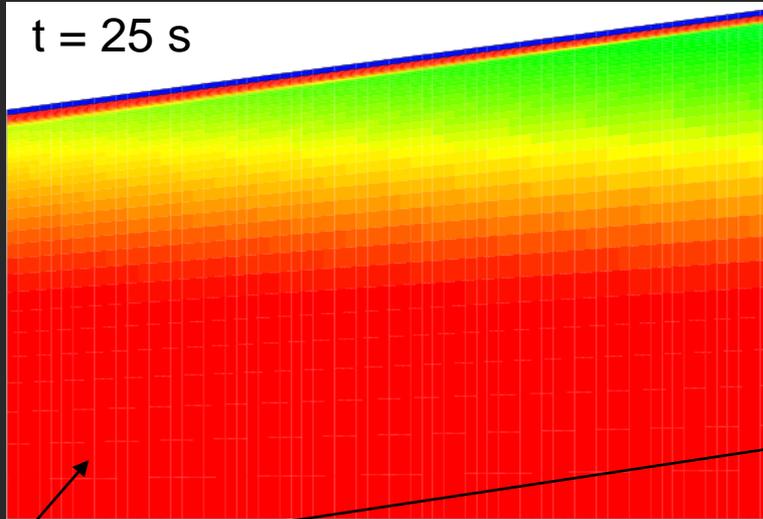
# Résultats (3)

→ Champ de vitesse au permanent pour le sol YCL



# Régime Hortonien

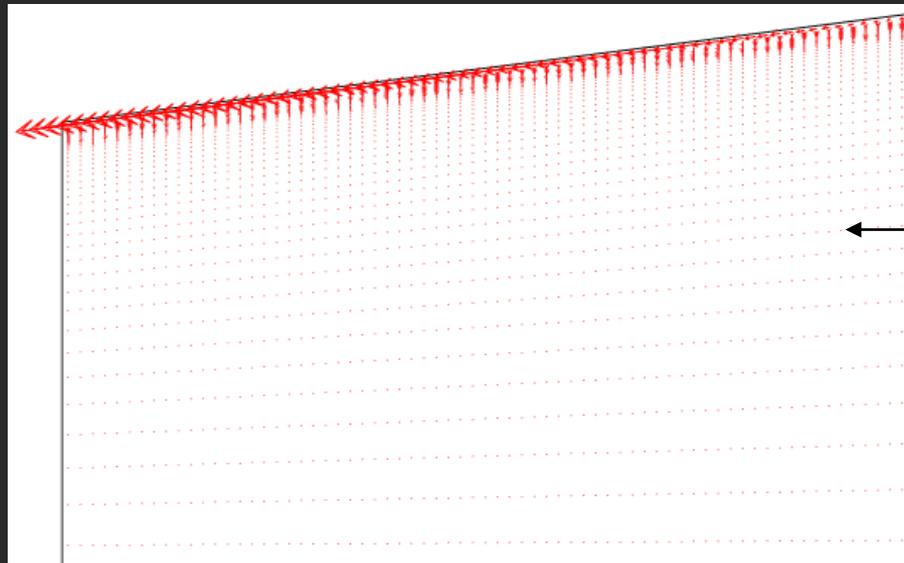
→ On utilise la géométrie du système d'Abdul & Gillham pour vérifier si notre système peut gérer un ruissellement de type Hortonien



Champ de saturation

Dans la couche:

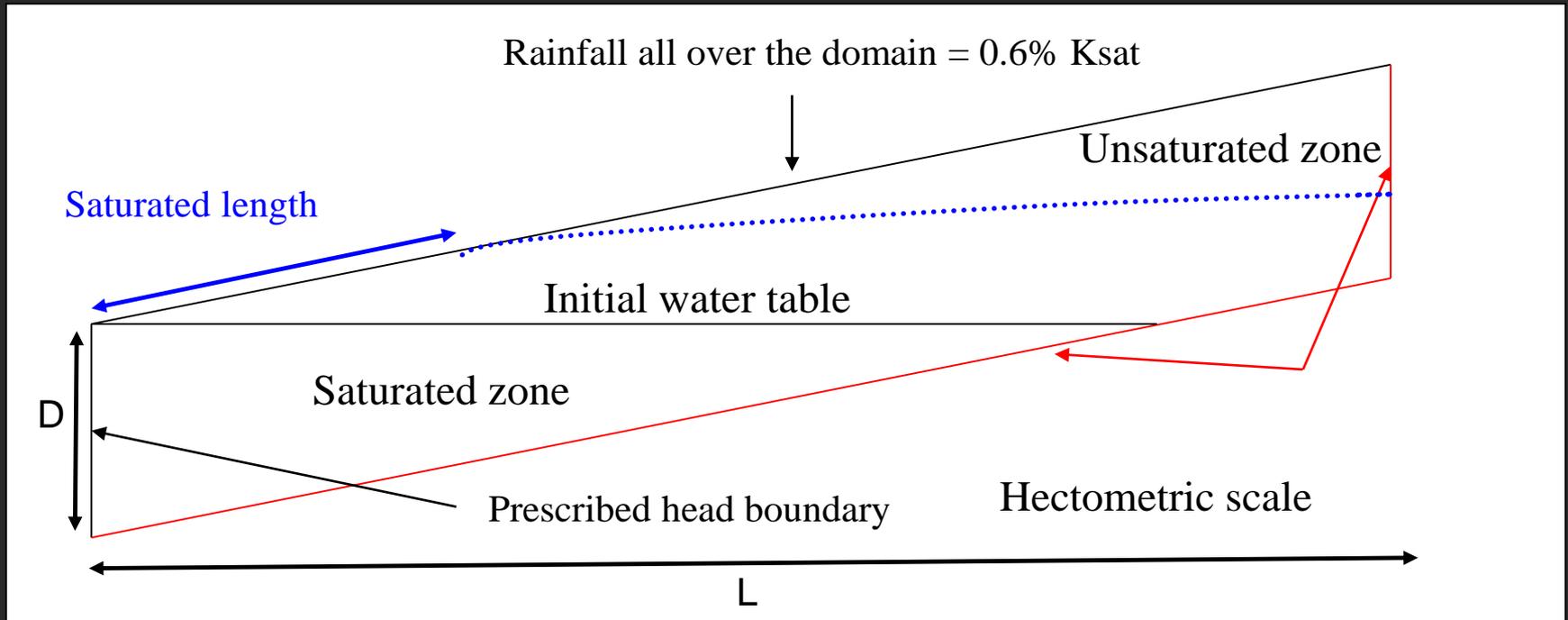
- Bleu = pas de ruissellement
- Rouge = ruissellement



← Champ de vitesse



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

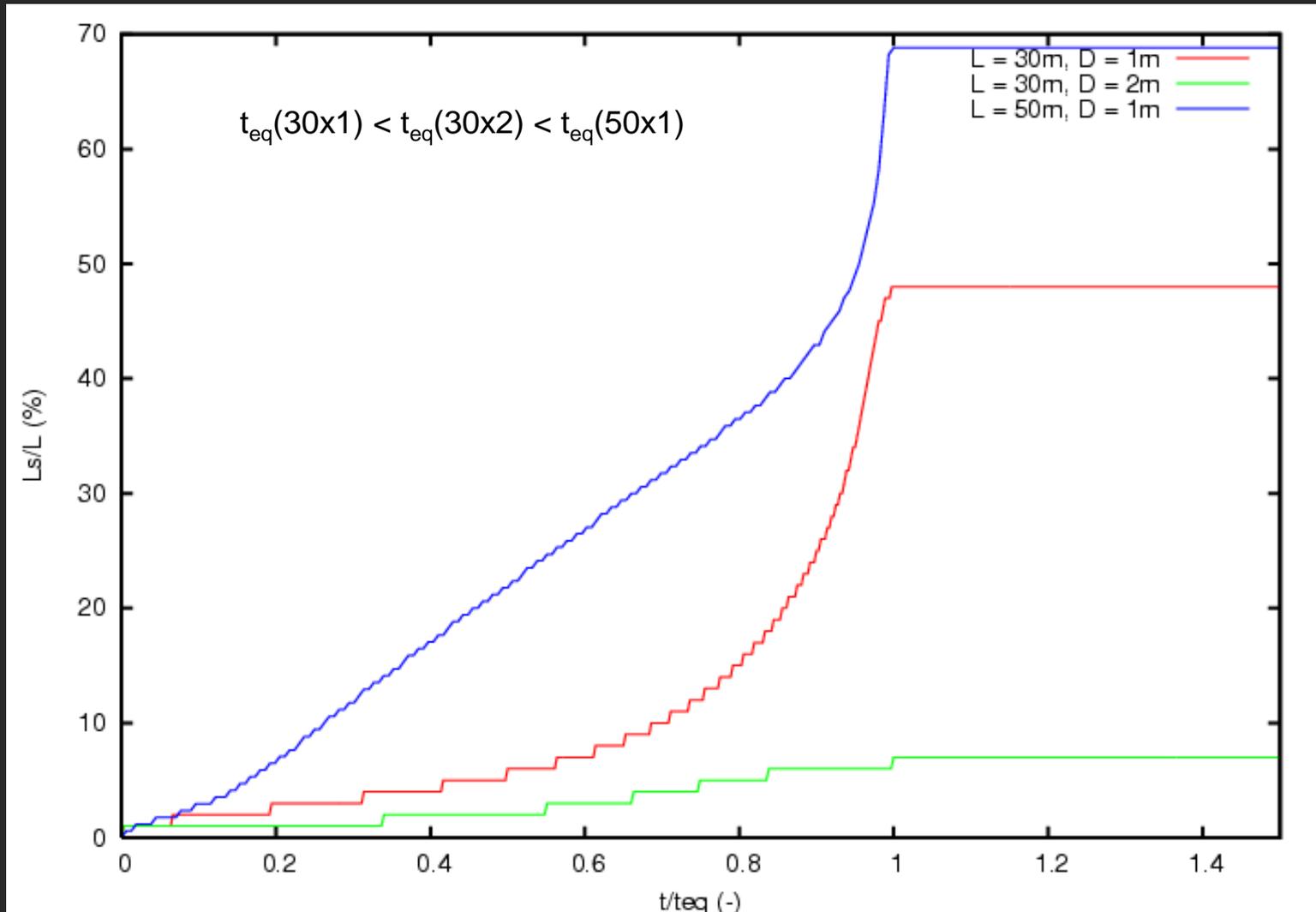


- Système étudié pour comprendre l'influence de différents paramètres géométriques (pente, longueur, profondeur...) sur la génération du processus de ruissellement
  - Le sol utilisé est très perméable et a une longueur capillaire très grande. Le système est initialement presque entièrement saturé
-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

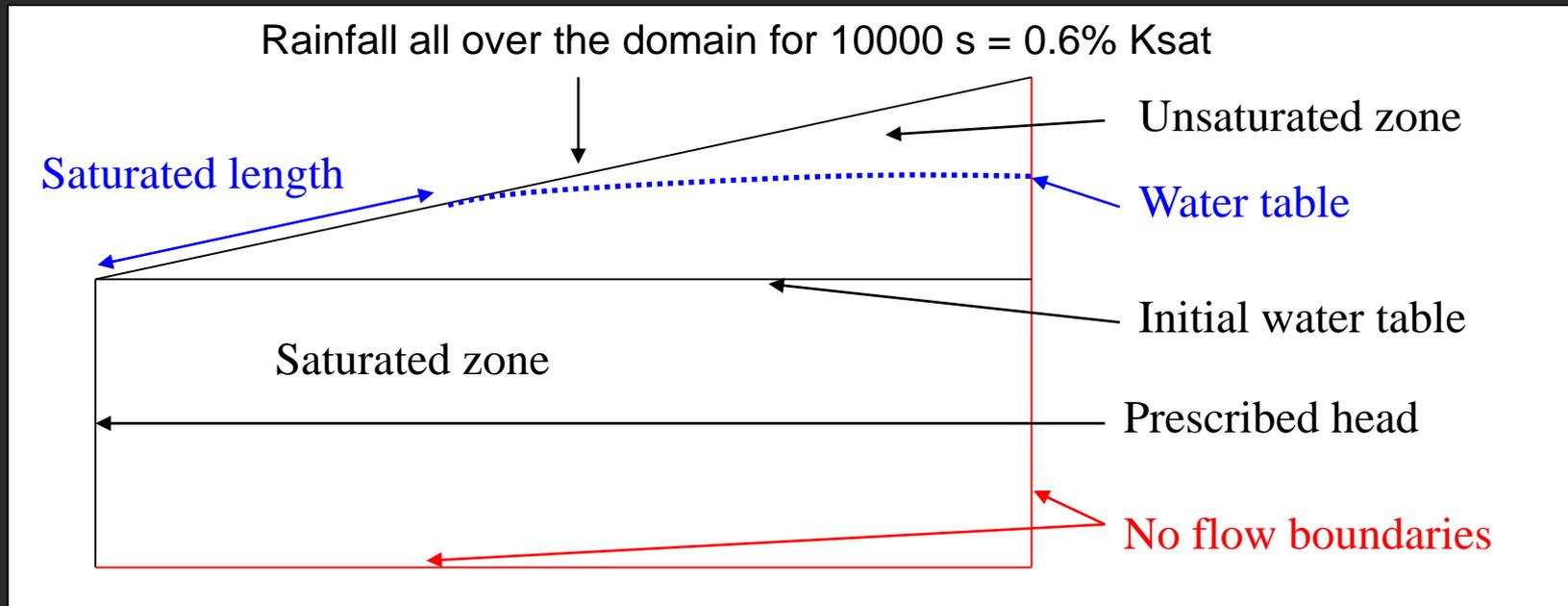


# Résultats

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



# Cas d'un créneau de pluie

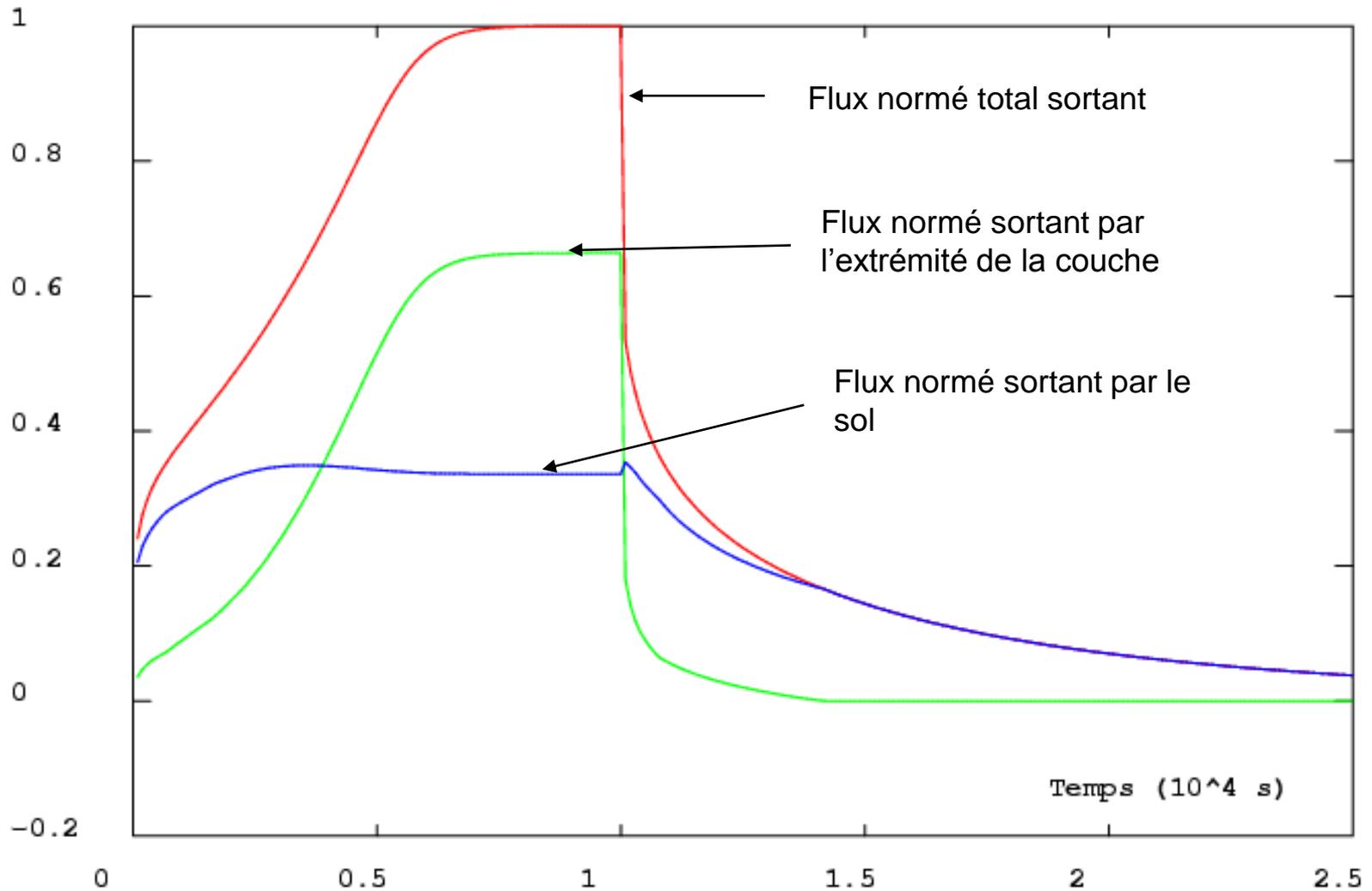


- Dimensions :  $L = 30 \text{ m}$  ,  $H = 1\text{-}4\text{m}$ , pente de 10%
- On utilise le même sol que celui du cas précédent : grande longueur capillaire et forte perméabilité
- Géométrie d'Abdul, caractéristiques de sol et conditions aux limites de Ogden
- On impose un créneau en pluie pour observer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



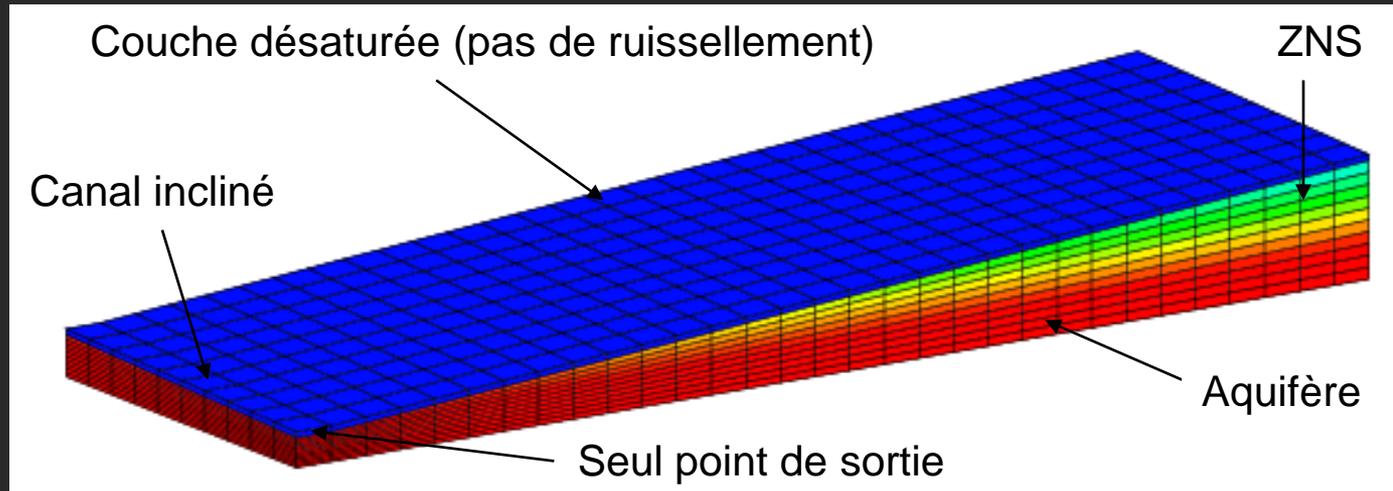
# Résultats

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

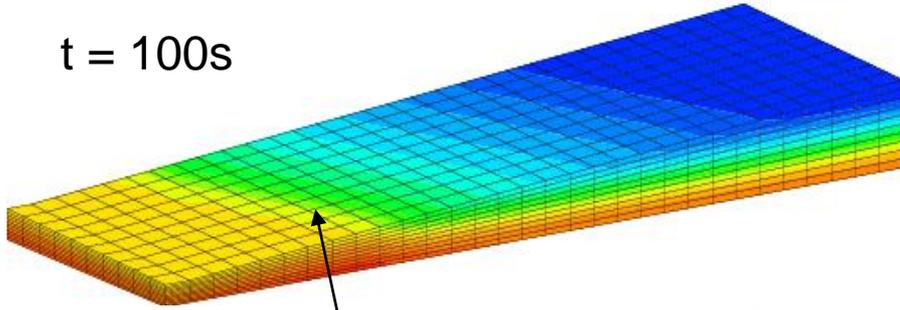


- Dimensions : 30 m de largeur, 10 m de longueur, épaisseur de 25 cm à 1.25 m
- Pente canal = 1%, pente sol = 5%
- Sol utilisé = YCL, pluie = 20% du Ksat pendant 60 minutes
- Condition initiale hydrostatique

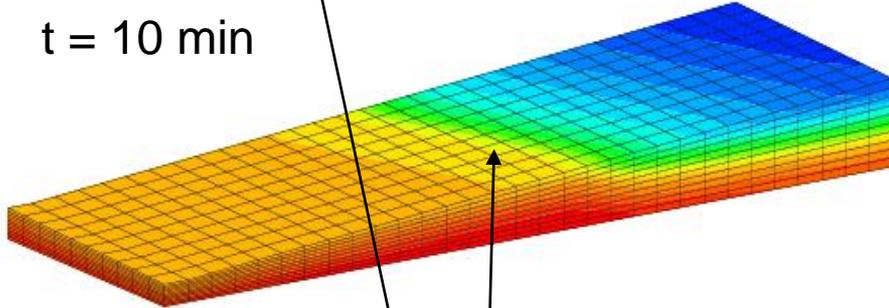


# Résultats : évolution des surfaces saturées contributives

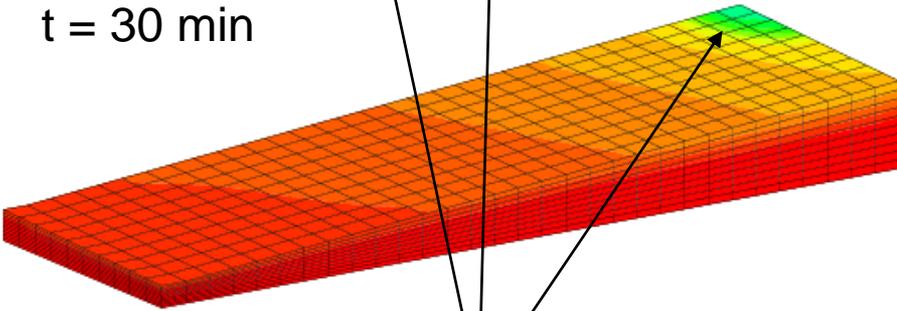
t = 100s



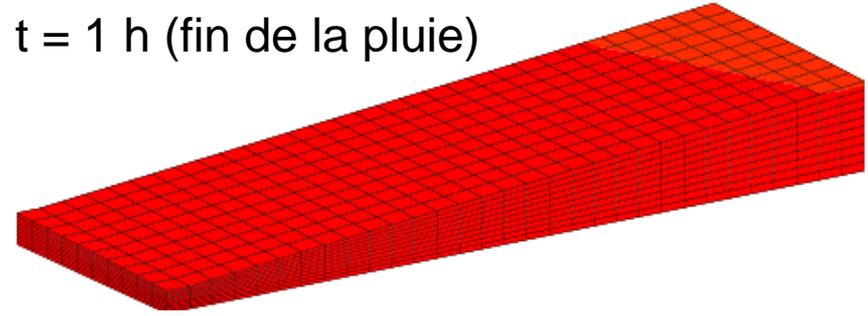
t = 10 min



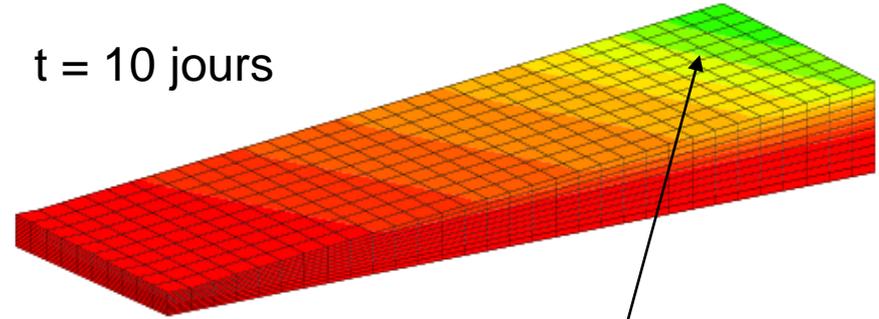
t = 30 min



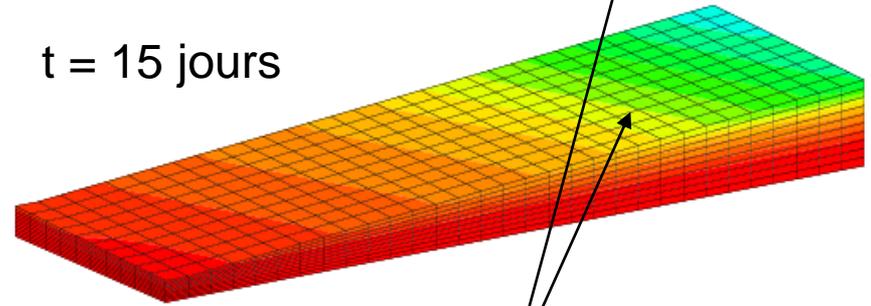
t = 1 h (fin de la pluie)



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

